



Metodika pro experimentální dvojrozměrnou analýzu samobuzených kmitů

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Ing. Markéta Petříková**
Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Šulc, CSc.





Methodology for the two-dimensional experimental analysis of self-excited oscillations

Dissertation

Study programme: P2302 – Machines and Equipment
Study branch: 2302V010 – Machine and Equipment Design
Author: **Ing. Markéta Petříková**
Supervisor: doc. Ing. Jaroslav Šulc, CSc.



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

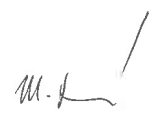
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 25.4.2016

Podpis: 

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Jaroslavu Šulcovi, CSc. a kolegům z Katedry energetických zařízení za inspiraci a spolupráci, pánům Jaroslavu Kneřovi a Petru Jerjemu, spoluautorům užitého vzoru, za jejich technickou pomoc, Ing. Pavlu Kryštůfkovi za pomoc s počítačovou technikou.

Děkuji své dceři Šárce za podporu a důvěru v dokončení této práce.

Anotace

Tato disertační práce je zaměřena na vývoj metodiky měření pro detekci samobuzených kmitů. Samobuzené kmity mohou být generovány při proudění kolem těles a při plnění dutin. V rámci této práce byla vyvinuta nová měřicí zařízení. Metodika měření byla ověřena na testovacích případech, které představovaly proudění kolem těles a proces plnění dutiny tekutinou. K identifikaci samobuzených nestacionárních kmitů byla použita „hydrodynamická vana“. Vizualizace proudění byla provedena pomocí hliníkového prachu, naneseného na vodní hladinu. Výška vodní hladiny a frekvence pulsací vodní hladiny byly měřeny vyvinutým snímačem. Měření byla porovnána s numerickými simulacemi. Získané výsledky byly využity při vývoji a ověření experimentální metodiky

Klíčová slova: hydrodynamická analogie, hydrodynamická vana, samobuzené kmity, pulsace v dutině, metodika experimentu, snímač frekvence pulsací, hladinoměr, vizualizace proudění, numerická simulace

Anotation

This doctoral thesis is focused on the development of the measurement methodology for the detection of self-excited oscillations. Self-excited oscillations may be generated by the flow around bodies and by the flow during the cavity filling. In the framework of this work new measurement devices were developed. The methodology was verified on test cases represented by the flow around various bodies and by the process of cavity filling with liquid. The hydrodynamic table was applied to identify the self-excited transient oscillations. Aluminum particles on the water surface were used for the flow visualization. The water surface and pulsation frequencies were measured by developed sensors. Experimental measurements were compared with numerical simulations. The obtained results were used in the development and verification of the experiment methodology.

Keywords: hydrodynamic analogy, hydrodynamic table, self-excited oscillations, pulsations in cavities, liquid level sensor, frequency sensor, flow visualization, experiment methodology, numerical simulations

Souhrn

Předložená disertační práce se věnuje experimentální činnosti při použití zařízení pro identifikaci samobuzených periodických nestacionarit a možnostem dalšího využití naměřených dat, pořízených záznamů vizualizací a numerických simulací. Souhrn poznatků a výsledků studia byl získán v průběhu let 2007-2015–v rámci doktorandského studia na Katedře energetických zařízení Fakulty strojní na Technické univerzitě v Liberci.

Disertační práce má sedm kapitol. V kapitole **1 Úvod** jsou vysvětleny pohnutky pro vznik práce, dále obsahuje stručnou informaci o analogiích mezi různými tekutinami a o mechanismu vzniku samobuzených nestacionarit. V kapitole **2 Modelování, podobnost, analogie** je teoretický základ, týkající se hydrodynamické analogie proudění tenké vrstvy vody v kanále s rovinným dnem a dvojrozměrného proudění plynu. V rámci této kapitoly je věnována pozornost chybám hydrodynamické analogie, chybám, způsobeným chováním modelové kapaliny a chybám a nejistotám měření. Je formulována směrnice pro výběr modelové kapaliny. Závěr kapitoly je věnován vlivu vizualizačních přísad na vlastnosti modelové kapaliny. V kapitole **3 Metody zviditelnění proudění kapalin** jsou komentovány vizualizační metody, vhodné pro použití v hydrodynamické vaně. V kapitole **4 Numerické simulace** jsou informace o modelech a software, použitých v této disertační práci, pro účely porovnávání s fotografiemi a s videozáznamy experimentů. Vlastní výsledky práce jsou v kapitolách 5 a 6. Kapitola **5 Experimentální zařízení pro vizualizace dvojrozměrného proudění kapalin** je věnována hydrodynamické vaně – její renovaci a modernizaci a vývoji nového příslušenství. Značná pozornost je věnována měření veličin a možnostem hydrodynamické vany. Detailní popis hydrodynamické vany, ilustrovaný velkým množstvím fotografií a návod k používání, je v publikaci „Hydrodynamická vana“ – [A1]. V kapitole **5.2.5 Hladinoměr se snímačem frekvence kmitání hladiny** je popsáno unikátní měřicí zařízení, navržené a zkonstruované v rámci disertační práce a zapsané Úřadem průmyslového vlastnictví jako užitečný vzor. V kapitole **5.3. Funkční možnosti hydrodynamické vany** jsou stanoveny funkční limity pro hydrodynamickou vanu. Stěžejní část práce je věnována experimentům. V kapitole **6 Experimenty** jsou experimenty, zaměřené zkoumání průtoku vody modelovými sestavami s dutinami. Dutiny jsou navrženy tak, aby při průtoku modelovou sestavou rozkmitaly do té doby klidný proud přítoku. Experimenty s obtékáním těles byly realizovány také, a to kvůli ověření platnosti dříve používaných postupů a definování limit pro renovované části hydrodynamické vany i příslušenství. Detailní popis těchto experimentů jev příručce „Testovací experimenty v hydrodynamické vaně“ – [A3]. Při experimentech s dutinami byla provedena měření různých veličin pomocí nitěných sond, mikrometru a hladinoměru se snímačem frekvence kmitání hladiny. Naměřené a vypočtené veličiny byly zpracovány formou grafů. Jednotlivé experimenty byly vizualizovány, vybrané snímky a videozáznamy byly porovnány s numerickými simulacemi. Kapitola je doplněna přílohami. V závěrečné kapitole **7 Závěr, splnění cílů disertační práce, přínosy pro vědní obor a praxi** jsou shrnuty získané výsledky a nové poznatky. Rovněž je komentováno splnění cílů disertační práce a jsou formulovány závěry pro rozvoj oboru.

Cíle disertační práce

Cílem této disertační práce je vývoj metodiky pro experimentální dvojrozměrnou analýzu samobuzených kmitů.

Splnění cíle disertační práce je podmíněno splněním následujících dílčích kroků:

- *kvantifikace rizik a chyb hydrodynamické analogie, vytvoření směrnice pro výběr modelové kapaliny,*
- *návrh a konstrukce snímače pro přesná měření výšek hladiny a frekvence kmitání hladiny, návrh a konstrukce traverzovacího zařízení,*
- *vývoj metodiky provádění experimentu.*

Obsah

1	Úvod	9
2	Modelování, podobnost, analogie	12
2.1	Hydrodynamická analogie	12
2.1.1	Proudění kapaliny v tenké vrstvě nad vodorovným dnem	13
2.1.2	Dvojměrné proudění plynu	15
2.1.3	Analogie mezi prouděním kapaliny a plynu	16
2.1.4	Modelová měřítka	19
2.1.5	Analogie protékajících množství	21
2.1.6	Analogie vodního skoku a rázové vlny	22
2.1.7	Chyby hydrodynamické analogie	24
2.2	Modelová kapalina	26
2.2.1	Voda	27
2.2.2	Voda s vizualizačními přísadami	30
3	Metody zviditelnění proudění kapalin	35
3.1	Vizualizační metody, založené na sledování částic, které tvoří souvislá vlákna ani větší souvislé oblasti	35
3.2	Vizualizační metody, založené na sledování částic, které tvoří souvislá vlákna nebo větší souvislé oblasti	36
3.3	Vizualizační metody, založené na sledování změn povrchu obtékaných těles	36
4	Numerické simulace	37
4.1	Použitý software	37
4.2	Použité řešiče, modely a diskretizační schémata	37
4.3	Okrajové podmínky	37
5	Experimentální zařízení pro vizualizaci dvojměrného proudění kapalin	38
5.1	Komerční analogová zařízení	38
5.2	Hydrodynamická vana	40
5.2.1	Měření průtočného množství	42
5.2.2	Měření rychlosti proudění	44
5.2.3	Měření výšky hladiny	47
5.2.4	Měření frekvence kmitání hladiny	52
5.2.5	Hladinový snímač frekvence kmitání hladiny	55
5.2.6	Traverzovací zařízení	57
5.3	Funkční možnosti hydrodynamické vany	59
5.3.1	Typy experimentu	59
5.3.2	Vhodné vizualizační metody	61
5.3.3	Modely	61
5.3.4	Vlastnosti vizualizačních ingrediencí	63
5.3.5	Číselné hodnoty vstupních podmínek	63
5.3.6	Měřené veličiny	64
5.3.7	Metody záznamu experimentu	65
6	Experimenty	66
6.1	Přehled realizovaných experimentů	66
6.2	Metodika provádění experimentů v hydrodynamické vaně	67
6.3	Plnění symetrické dutiny proudem tekutiny	75
6.3.1	Parametry pro experiment – symetrická dutina	76
6.3.2	Realizace experimentu a získané výsledky – symetrická dutina	77
6.3.3	Numerická simulace – symetrická dutina	81
6.4	Plnění nesymetrické dutiny proudem tekutiny	82
6.4.1	Parametry pro experiment a měření – nesymetrická dutina	83
6.4.2	Realizace experimentu a získané výsledky – nesymetrická dutina	85
6.4.3	Možnosti využití výsledků měření – nesymetrická dutina	93

6.4.4	Numerické simulace – nesymetrická dutina	98
6.4.5	Porovnání numerických simulací a experimentu – nesymetrická dutina	101
7	Závěr, splnění cílů dizertační práce, přínosy pro vědní obor a praxi	106
7.1	Kvantifikace rizik a chyb hydrodynamické analogie, vytvoření směrnice pro výběr modelové kapaliny	106
7.2	Návrh a konstrukce snímače pro přesná měření výšek hladiny a frekvence kmitání hladiny, návrh traverzovacího zařízení	106
7.3	Vývoj metodiky provádění experimentů v hydrodynamické vaně	107
7.4	Přínos pro obor	108
7.5	Návaznost na disertační práci	108
	Použitá literatura	109
	Vlastní publikace	109
	Vlastní osvědčení	110
	Literatura a odkazy k teoretické části disertační práce	110
	Knihy, skripta, učební texty	110
	Internetové knihy	111
	Internetové odkazy	111
	Literatura k experimentální části disertační práce	111
	Analogová zařízení	111
	Modely	111
	Vizualizační ingredience	112
	Měřicí přístroje	112
	Software	112
	Literatura k užitému vzoru	112
	Internetové knihy	112
	Katalogy	112
	Úřad průmyslového vlastnictví	113
	Osvědčení u zápisu užitého vzoru	115

Použité veličiny, symboly a označení

rozměrové veličiny

$a(nm)$	rozměr částic disperzní fáze, ekvivalentní průměr částic
$c(m \cdot s^{-1})$	rychlost šíření vln na hladině, rychlost zvuku
$d(m)$	délka
$D(nm^{-1})$	stupeň disperzity
$h(m)$	výška hladiny
$f(Hz)$	frekvence
$F_p(N)$	tlaková síla
$F_H(N)$	hybnostní síla
$F_s(N)$	setrvačná síla
$F_T(N)$	třecí síla
$g(m \cdot s^{-2})$	tíhové zrychlení
$i(J \cdot kg^{-1})$	měrná entalpie
$kr(m^2 \cdot g^{-1})$	krycí schopnost hliníkového prachu
$m(kg)$	hmotnost
$m(m)$	velikost mezery
$M(kg \cdot kmol^{-1})$	molární hmotnost
$n(m)$	rozměr nádoby (dutiny) ve směru proudění
$p(Pa)$	tlak
$p_B(Pa)$	barometrický tlak
$r(m)$	poloměr
$S(m^2)$	plocha
$t(s)$	čas
$V(m^3)$	celkový objem
$\dot{V}(m^3 \cdot s^{-1})$	objemový tok
$w(m \cdot s^{-1})$	rychlost proudění
$w_x, w_y, w_z(m \cdot s^{-1})$	rychlost proudění ve směru os x, y, z
$\alpha, \beta(^{\circ})$	úhly
$\delta(\%)$	relativní chyba
$\eta(Pa \cdot s)$	dynamická viskozita
$\lambda(m)$	vlnová délka

$\nu(m^2 \cdot s^{-1})$	kinematická viskozita
$\rho(kg \cdot m^{-3})$	hustota
$\sigma(N \cdot m^{-1})$	povrchové napětí
$\vartheta(^{\circ}C)$	teplota

bezrozměrové veličiny

H	poměrná výška hladiny
Ma	Machovo číslo
n	počet částic (v koloidním systému)
P	poměrný tlak
po	poměr ploch (pokrytí hliníkovým prachem k celé ploše obarvené vody)
R	poměrná hustota
Re	Reynoldsovo číslo
Sh	Strouhalovo číslo
T	bezrozměrový čas
W	poměrná rychlost
x, y, z	osy souřadného systému
xy	rovina
X, Y	poměrné délky ve směru os x, y
ξ	tvarový koeficient dispergované částice
κ	adiabatický exponent (Poissonova konstanta)
Θ	poměrná teplota
$\gamma_L, \gamma_W, \gamma_T$	modelová měčítka: délky, rychlosti, času
φ	objemový zlomek disperzního podílu

dolní indexy

g	plyn
M, D, K	model, dílo, kanál
KR	kritická hodnota
KS	koloidní soustava
\check{C}	jedna částice disperzního podílu
l	kapalina
\max, \min	maximální, minimální hodnota
n	směr normály
s	tuhá látka
$stř$	střední hodnota
t	směr tečny
T	tryska
U	určující (charakteristický) rozměr, hodnota
x, y	hodnota, vztažená ke směru os souřadného systému
0	počáteční stav
∞	hodnoty v nekonečnu

1 Úvod

Teorie a praxe tvoří neoddělitelnou jednotu a nemohou existovat jedna bez druhé. Teorie je určitý druh vědomí, praxe je konkrétní činnost. Jednou z forem praxe je experiment. Je charakteristický zkoumáním jevů, při nichž se mění podmínky nebo průběh. Příprava, realizace i vyhodnocování experimentů vyžadují velkou dávku trpělivosti, preciznosti, intuice a improvizace. Experimentování je extrémně náročné na čas a obvykle se nedá nahradit klikáním myši v klidu kanceláře. To je důvod, proč s prudkým rozvojem výpočetní techniky chuť experimentovat na přechodnou dobu ochladla. S postupem času se ale ukázalo, že bez řádně vedených experimentů se výzkum neobejde.

Hydrodynamická vana je zařízení, vhodné pro studenty mladších věkových kategorií, protože mohou poměrně snadno a rychle získat představu o proudění. Pokročilí studenti si mohou ověřit výsledky numerických simulací. Všichni ale potřebují návod k obsluze zařízení, popis pracovních postupů, informace o omezeních apod. V minulosti prováděné úlohy byly realizovány metodou pokus-omyl. Vyhodnocovalo se z klasických fotografií vizualizace, výška hladiny se měřila mikrometrem, průtok se zjišťoval z hmotnosti vody, proteklé za daný čas. Snaha o zlepšení situace, odpovídající „době počítačů“, byla pohnutkou pro vylepšení hydrodynamické vany a vývoj přesnějších měřidel. Byla také základním impulsem pro vznik metodicko-didakticky laděné disertační práce

Svět je plný tekutin – umožňují samotnou existenci lidstva se všemi výhodami i nevýhodami. Tekutiny představují důležitou pracovní látku, která zdánlivě neklade velký odpor (například při dopravě potrubím), ale přesto mají velký vliv na povrchy, s nimiž přijdou do kontaktu. Proudění všech tekutin se řídí stejnými základními zákony, detailnější zákonitosti se u jednotlivých tekutin pochopitelně liší, protože se liší jejich fyzikální vlastnosti. Pro studium chování tekutin a zejména experimentování je výhodné to, že u některých tekutin lze pozorovat probíhající procesy snadněji než u jiných. Tato skutečnost dala podnět k hledání analogií mezi různými tekutinami.

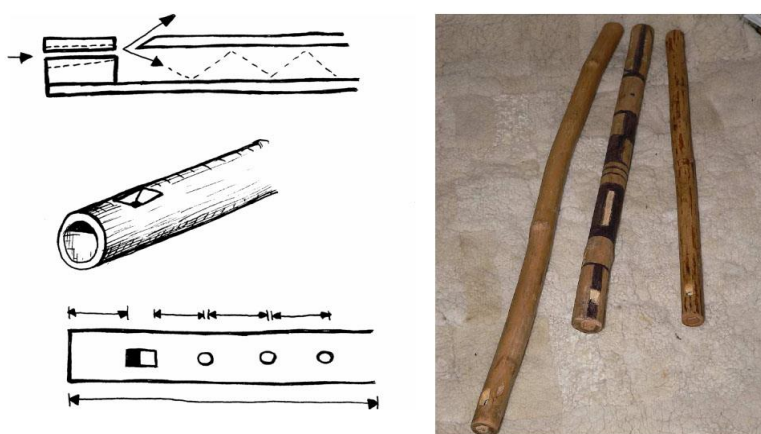
Příkladem je hydrodynamická analogie, která platí mezi dvourozměrným prouděním plynu a prouděním mělké kapaliny s volnou hladinou. Proudění plynu lze zkoumat na dvourozměrném proudění kapaliny. Přitom lze využít výhod velmi názorného analogového způsobu řešení, kde mimo jiné příliš nezáleží na komplikovanosti počátečních a okrajových podmínek úloh. Přitažlivost hydrodynamické analogie spočívá i v tom, že se dosahuje velkého časového měřítka, daného malou rychlostí šíření vln na hladině kapaliny ve srovnání s rychlostí zvuku v plynu.

V matematické formě byla hydrodynamická analogie poprvé uvedena pravděpodobně ve Francii Jouguetem a Riabouchinskim. Přitom se ukázalo, že analogie platí přesně pouze pro izoentropické proudění plynu s adiabatickým exponentem $\kappa = 2$. Větší pozornost vzbudila tato analogie mezi rázovou vlnou v plynu a vodním skokem na hladině kapaliny. Analogie se využívalo převážně ke studiu obtékání profilů a lopatkových mříží a při proudění kanály. Avšak i při proudění tekutin v dutinách lze pozorovat řadu jevů, pro jejichž výzkum se analogie hodí.

Jedním z jevů, identifikovatelných při proudění tekutin do dutin, jsou pulsace. Rozkmitání tekutiny kontinuálním proudem nepulsního charakteru vzniká samovolně a je známé pod pojmem samobuzené kmitání. Samobuzené kmitání může mít spojitý nebo nespojitý, relaxační charakter. Charakter pulsací závisí zejména na intenzitě přítoku a na geometrii modelové sestavy. Není-li rychlost tekutiny dostatečná, pulsace nevzniknou anebo jsou nepravidelné. Z hlediska geometrie je důležitá vzdálenost dutiny od ústí přítoku, tvar dutiny a poloha dutiny vůči přítoku.

Příkladem spojitého samobuzeného kmitání tekutiny je rozechvívání vzduchového sloupce v píšťálách hudebních nástrojů, příkladem nespojitého – relaxačního kmitání je např. vodní trkač. Kmity mají v tomto případě charakter pulsů. Uvedené příklady kmitání mají pozitivní vliv – hudba povznáší, trkač slouží k dopravě vody, ale samobuzené kmity se mohou projevit i negativně. Rozvibruje-li se například ventil, umístěný za čerpadlem, vzniklé vibrace mohou nepříznivě ovlivnit chod čerpadla.

V souvislosti se studiem samobuzených kmitů, vznikajících v důsledku plnění a vyprázdnění dutin, lze jako zajímavost zmínit vznik tónů v dechových hudebních nástrojích (píšťálách). Vzduch je do nitra nástroje přiváděn dechem muzikanta (flétny, klarinety,...) nebo pomocí měchů naplněných vzduchem (píšťaly varhan). Sloupec vzduchu se rozkmitá a z nástroje vyjde tón. Kvalita vzniklého tónu závisí na velikosti a tvaru nástroje, ale i na fyzických parametrech a cviku muzikanta, v případě měchů je rozhodující jejich kvalita a úroveň. Tón, který z nástroje vyjde, určuje řada faktorů: frekvence rozkmitaného sloupce vzduchu, vlnová délka, tvar vnitřního prostoru nástroje. Hodnoty frekvence a vlnové délky a tvar „sloupce“ vzduchu jsou určující pro základní vlastnosti tónu, přičemž každá z nich má těsnou souvislost s technikou. Základní vlastnosti tónu je výška tónu, je dána frekvencí kmitání sloupce vzduchu. Frekvenci lze ovlivnit rychlostí vzduchu vháněného do nástroje a délkou vzduchového sloupce. Rychlost vzduchu je regulována dýchacím aparátem a ústy muzikanta, čím rychleji je vzduch foukán do nástroje, tím vyšší je frekvence kmitání vzduchového sloupce i tón. Délka vzduchového sloupce se mění zakrýváním a odkrýváním otvorů: čím je vzduchový sloupec kratší, tím je frekvence kmitů i tón vyšší. Tóny se dají tvořit i v píšťálách bez otvorů – rozechvění a vyluzování tónů se dosahuje zakrýváním a odkrýváním spodního konce a silou vefukovaného vzduchu. Rozkmitání sloupce lze dosáhnout také foukáním proti ostré hraně, příkladem mohou být hrany v ústí fléten na obrázku č.Obr. 1.



Obr. 1 Příkladem dechových nástrojů jsou jednoduché flétny – flétny s otvory nebo dlouhé flétny bez otvorů, tzv. koncovky

Ve spojitosti s experimentem je důležitá rychlost modelové tekutiny, daná objemovým přítokem, variabilní vzdálenost konce dutiny od ústí přítoku a samozřejmě i ostrá hrana, umístěná proti ústí přítoku. V rámci experimentů je důležité identifikovat, zda za daných podmínek vznikne tón nebo hluk. Tón je projevem periodického kmitání, projevem neperiodického kmitání je hluk.

Kromě vlastností zvuku je pro vznik tónů (u experimentu pro vznik chvění modelové tekutiny) důležitá i kontinuita přiváděného vzduchu. Při hře na hudební nástroj je situace komplikována nutností nádechů, takže přívod vzduchu je vždy na nějakou dobu přerušen. Po obnovení přívodu vzduchu do nástroje se vzduch znovu rozkmitá, ale nástroj reaguje se zpožděním. S tím je třeba počítat zejména při souhře, protože muzikant si musí vycvičit odhad kdy začít foukat, aby zvuk z nástroje vyšel včas. V rámci experimentu je třeba kontrolo-

vat stabilitu přívodu modelové tekutiny, neboť jakákoli jeho nerovnoměrnost se vzhledem k relaxaci velmi těžko identifikuje. Frekvence, tvar a délka dutiny, rychlost a kontinuita přívodu tekutiny, to jsou parametry, které hrají významnou úlohu při přípravě a realizaci experimentů, při provádění měření, vyhodnocování a vyvozování závěrů. Příklad hudebního nástroje a s ním spojený vznik tónů jsou důkazem toho, že ke vzniku kmitání není nutno mít k dispozici sílu periodického charakteru, ale stačí, aby byla do systému dodávána energie, která by pokryla ztráty tlumením a udržela soustavu v rozkmitaném stavu.

2 Modelování, podobnost, analogie

Modelování je specifická forma experimentu, sloužící k poznání různých objektivních zákonitostí. Provádí se především pro účely popisu a vysvětlení stavu a chování modelovaného systému. Podstatou modelování je vytvoření a přiřazení modelu k dílu na základě analogie a podobnosti. Modely jsou vyráběny jako zmenšeniny nebo zvětšeniny díla, což znamená, že ve výsledku je třeba počítat s určitými nepřesnostmi, zejména nedokonalostmi tvarů a nedodržením drsností.

Modelování není jen samotná tvorba modelu, ve smyslu výzkumné techniky zahrnuje jeho přetváření, hodnocení a zpětnou vazbu na reálnou skutečnost. S touto činností souvisí také výběr podmínek: na některé je třeba se soustředit, jiné lze zanedbat.

Podstatou modelování je podobnost a analogie modelu a díla: podobnost se týká fyzikálně podobných systémů a procesů, analogie využívá matematické podobnosti fyzikálně odlišných a nezávislých systému a procesů – [1].

Fyzikální podobnost vyjadřuje podobnost mezi systémy a procesy stejné podstaty a zahrnuje podobnost geometrickou a podobnost bezrozměrných parametrů a stavových veličin – [32]. Z geometrie je známo, že při vzájemné podobnosti útvarů se transformují úhly mezi těmito útvary identicky, délky se násobí poměrem délek, plochy druhou a objemy třetí mocninou tohoto poměru. Cílem teorie podobnosti je nalezení vztahů pro přepočty fyzikálních veličin mezi geometricky podobnými situacemi. Bez této teorie by nebylo možné vyšetřovat proudění tekutin na zmenšených nebo zvětšených modelech.

Analogie vychází z podobnosti rovnic, popisujících model a dílo a z rovnosti příslušných kritérií. Matematické modely jsou dány soustavou rovnic, nejčastěji diferenciálních a podmínkami jednoznačnosti řešení. Analogie se využívá v případech, kdy měření na díle je obtížné nebo nerealizovatelné, zatímco na modelu, stanoveném analogií, je jednodušší.

Podstata analogového řešení spočívá v tom, že k vyšetřovanému procesu se vyhledá fyzikální děj, který splňuje matematické podmínky a v němž je vyvinuta dostatečně přesná a přiměřeně pohodlná měřicí technika. Existuje-li pro daný problém několik možností analogií, volí se kompromis mezi přesností výsledků, možnostmi měření, snadnou výrobou modelů, názorností výsledků, případně možnostmi dalšího zpracování.

Většina analogií je přibližná, protože srovnávané diferenciální rovnice bývají odvozeny s řadou zjednodušení a často se okrajové podmínky nedají vymodelovat tak, aby se mohly kvantitativní výsledky přenést přímo na vyšetřovaný děj. Z toho důvodu se diferenciální rovnice analogických dějů převádějí do bezrozměrného tvaru, takže výsledkem je popis dvou analogických dějů týmiž rovnicemi, přičemž fyzikální význam proměnných a koeficientů je odlišný.

Z hlediska přesnosti je v hydrodynamice za dostatečně přesné výsledky považuje relativní chyba pod 5% maximální hodnoty, v dynamice plynů chyba pod 10%. Přesto jsou analogová měření velmi významná, jednak proto, že mají výhody experimentu (přehlednost, názornost, rychlost, cena), ale zejména při výběru hodnot pro numerické zpracování a zpřesnění (optimalizaci).

2.1 Hydrodynamická analogie

Hydrodynamická analogie je univerzální metoda k řešení podzvukového i nadzvukového proudění stlačitelné tekutiny, při níž se využívá shody rovnic rovinné dynamiky plynů s rovnicemi proudění kapaliny v tenké vrstvě nad vodorovným dnem – [2], [3], [4]. Tato teorie

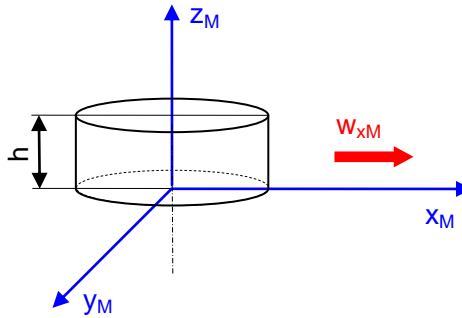
je základem modelování v hydrodynamické vaně s nízkou hladinou. Modelem jsou jevy ve vodě, dílem jevy v plynu. V dalším textu jsou hodnoty, příslušející kapalině indexovány písmenem M (model) a hodnoty odpovídající plynu písmenem D (dílo).

2.1.1 Proudění kapaliny v tenké vrstvě nad vodorovným dnem

K odvození hydrodynamické analogie byl zaveden pravoúhlý souřadný systém x_M, y_M, z_M , v němž osy x_M, y_M leží v rovině dna kanálu a osa z_M odpovídá výšce volné hladiny kapaliny, měřené ode dna kanálu. Výška volné hladiny h a rychlosti proudění w_{xM}, w_{yM}, w_{zM} jsou funkcemi souřadnic x_M, y_M, z_M a času t_M .

Pro spojitě proudění ideální kapaliny byla zvolena jednoduchá uzavřená válcová plocha, jejíž osa je rovnoběžná s osou z_M . Tato plocha je omezena dnem kanálu a volnou hladinou – viz obrázek č.Obr. 2.

Při obtékání zvoleného tělesa kapalinou je její proud v nekonečnu paralelní $w = w_\infty$ a tloušťka vrstvy kapaliny je $h = h_\infty$. Počáteční podmínky jsou $w = w(t_0)$, $h = h(t_0)$. Okrajové podmínky vycházejí z předpokladu, že tekutina lpí na smáčeném povrchu, tj. $w = 0$, pro volnou hladinu $z_M = h_M$ odpovídá rychlost kapaliny na hladině rychlosti vzduchu a tlak na volné hladině (při zanedbání povrchového napětí) barometrickému tlaku.



Obr. 2 Pravoúhlý souřadný systém - [3]

Ze zákona zachování hmoty pro kapalinu a spojitě nezřídlové proudění plyne, že časová změna objemu uvnitř válcové plochy je rovna objemu kapaliny, protékající válcovou plochou dovnitř¹:

$$\frac{\partial}{\partial t_M} \cdot \iint_S h_M dx_M dy_M = - \iint_S \left[\frac{\partial}{\partial x_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{xM} dz_M + \frac{\partial}{\partial y_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{yM} dz_M \right] dx_M dy_M. \quad (2.1)$$

Protože byla válcová plocha zvolena nezávisle na čase, lze rovnici (2.1) upravit na tvar

$$\begin{aligned} {}^1 \dot{V}_M &= \frac{\partial}{\partial t_M} \cdot \iint_S h_M dx_M dy_M \\ \dot{V}_M &= \iint_S \left[\left(\int_0^{h_M} w_{yM} dz_M \right) dx_M - \left(\int_0^{h_M} w_{xM} dz_M \right) dy_M \right] = - \iint_S \left[\frac{\partial}{\partial x_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{xM} dz_M + \frac{\partial}{\partial y_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{yM} dz_M \right] dx_M dy_M \end{aligned}$$

$$\iint_S \left[\frac{\partial h_M}{\partial t_M} + \frac{\partial}{\partial x_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{xM} dz_M + \frac{\partial}{\partial y_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{yM} dz_M \right] dx_M dy_M = 0. \quad (2.2)$$

Aby získaný výraz platil pro každou válcovou plochu, musí být integrovaná funkce rovna nule:

$$\frac{\partial h_M}{\partial t_M} + \frac{\partial}{\partial x_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{xM} dz_M + \frac{\partial}{\partial y_M} \cdot \int_0^{h_M} w_{yM} dz_M = 0. \quad (2.3)$$

Získaná rovnice 2.3. je obecným tvarem rovnice kontinuity pro jakékoliv spojitě nezřídlové proudění kapaliny s volnou hladinou nad rovinným dnem.

Pohybové rovnice ve směrech x, y, z pro ideální kapalinu (zanedbává se viskozita a povrchové napětí) lze napsat ve složkovém tvaru

$$\frac{\partial w_{xM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial x_M}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial w_{yM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial y_M}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w_{zM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial z_M} - g. \quad (2.6)$$

Levá strana rovnice (2.6) představuje zrychlení částice kapaliny v daném místě ve směru osy z_M . Za předpokladu, že se jedná o proudění s malou výškou hladiny, kde charakteristický rozměr proudění je velký vůči základní hloubce hladiny, lze toto zrychlení zanedbat proti zrychlení zemské tíže, takže lze psát

$$0 = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial z_M} - g. \quad (2.7)$$

Integrací této rovnice se dostane

$$p_M = -\rho_M \cdot g \cdot z_M + f(x_M, y_M, t_M), \quad (2.8)$$

tj. rozložení hydrostatického tlaku ve směru osy z_M . Funkce f se určí z okrajové podmínky pro volnou hladinu $z_M = h_M$, kde při zanedbání vlivu povrchového napětí je tlak roven vnějšmu barometrickému tlaku p_B . Tlak v kapalině je pak dán výrazem

$$p_M = -\rho_M \cdot g \cdot z_M + f(x_M, y_M, t_M) = \rho_M \cdot g \cdot (h_M - z_M) + p_B. \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial p_M}{\partial x_M} = \rho_M \cdot g \cdot \frac{\partial h_M}{\partial x_M}, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial p_M}{\partial y_M} = \rho_M \cdot g \cdot \frac{\partial h_M}{\partial y_M}. \quad (2.11)$$

Tyto derivace nezávisí na souřadnici z_M (h_M je funkcí x_M, y_M, t_M). Protože levé strany pohybových rovnic (2.4.) a (2.5), představují pro částici kapaliny, nacházející se právě v místě

(x_M, y_M, z_M) , zrychlení ve směrech příslušných os, znamená to, že tato zrychlení jsou také nezávislá na z_M . Aby to bylo možné, musí být i složky rychlosti proudění w_{xM} a w_{yM} pouze funkcemi x_M, y_M, t_M , tj.

$$w_{xM} = w_{xM}(x_M, y_M, t_M), \quad (2.12)$$

$$w_{yM} = w_{yM}(x_M, y_M, t_M). \quad (2.13)$$

Původní počet tří pohybových rovnic (2.4.), (2.5.) a (2.6) se zredukoval na dvě rovnice (2.14), (2.15), v nichž všechny proměnné jsou funkcemi pouze x_M, y_M, t_M :

$$\frac{\partial w_{xM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial y_M} = -g \cdot \frac{\partial h_M}{\partial x_M}, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial w_{yM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial y_M} = -g \cdot \frac{\partial h_M}{\partial y_M}, \quad (2.15)$$

a také rovnice kontinuity (2.3) se zjednodušila:

$$\frac{\partial h_M}{\partial t_M} + \frac{\partial (h_M \cdot w_{xM})}{\partial x_M} + \frac{\partial (h_M \cdot w_{yM})}{\partial y_M} = 0. \quad (2.16)$$

Rovnice (2.14), (2.15) a (2.16) popisují proudění ideální nestlačitelné tekutiny (bez viskozity η_M , povrchového napětí σ_M a s konstantní hustotou ρ_M) pro případy, kdy výška volné hladiny je ve srovnání s rozměry v rovině $x_M y_M$ nekonečně malá. Všechny proměnné jsou funkcemi dvou souřadnic x_M, y_M a času t_M , a přestože výšku hladiny h_M měříme ve směru třetí souřadnice z_M , jedná se o proudění dvojrozměrné (kvazi dvojrozměrné).

2.1.2 Dvojrozměrné proudění plynu

Stejně jako u kapaliny je i pro plyn zaveden pravoúhlý souřadný systém x_D, y_D, z_D , rychlosti ve směru příslušných os w_{xD}, w_{yD}, w_{zD} , hustota plynu je funkcí souřadnic a času $\rho_D = \rho_D(x_D, y_D, z_D, t_D)$. Dvojrozměrnost proudění je dána tím, že $w_{zD} = 0$ a všechny veličiny, určující proudění plynu jsou na z_D nezávislé. Rovnice kontinuity má tvar

$$\frac{\partial \rho_D}{\partial t_D} + \frac{\partial (\rho_D \cdot w_{xD})}{\partial x_D} + \frac{\partial (\rho_D \cdot w_{yD})}{\partial y_D} = 0, \quad (2.17)$$

pohybové rovnice

$$\frac{\partial w_{xD}}{\partial t_D} + w_{xD} \cdot \frac{\partial w_{xD}}{\partial x_D} + w_{yD} \cdot \frac{\partial w_{xD}}{\partial y_D} = -\frac{1}{\rho_D} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x_D}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial w_{yD}}{\partial t_D} + w_{xD} \cdot \frac{\partial w_{yD}}{\partial x_D} + w_{yD} \cdot \frac{\partial w_{yD}}{\partial y_D} = -\frac{1}{\rho_D} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial y_D}. \quad (2.19)$$

Rovnice (2.17), (2.18) a (2.19) nepopisují obecně proudění plynu, jako tomu bylo u kapaliny, chybí rovnice závislosti tlaku p_D a hustoty ρ_D , která se získá z analogie mezi prouděním kapaliny s malou výškou hladiny a prouděním plynu.

2.1.3 Analogie mezi prouděním kapaliny a plynu

Analogie se provede porovnáním rovnic, popisujících proudění kapaliny a proudění plynu, včetně jejich počátečních a okrajových podmínek – [3]. Pro tento účel se rovnice převedou do bezrozměrného tvaru². Bezrozměrné veličiny (v tomto případě se jedná vesměs o simplex) jsou značeny velkými písmeny³, charakteristické (určující) veličiny jsou indexovány písmenem "U"⁴.

Proudění kapaliny

$$X_M = \frac{x_M}{d_{MU}}, \quad Y_M = \frac{y_M}{d_{MU}}, \quad (2.20)$$

$$W_{xM} = \frac{w_{xM}}{w_{MU}}, \quad W_{yM} = \frac{w_{yM}}{w_{MU}}, \quad (2.21)$$

$$T_M = \frac{t_M}{t_{MU}}, \quad (2.22)$$

$$H_M = \frac{h_M}{h_{MU}}. \quad (2.23)$$

Proudění plynu

$$X_D = \frac{x_D}{d_{DU}}, \quad Y_D = \frac{y_D}{d_{DU}}, \quad (2.24)$$

$$W_{xD} = \frac{w_{xD}}{w_{DU}}, \quad W_{yD} = \frac{w_{yD}}{w_{DU}}, \quad (2.25)$$

$$T_D = \frac{t_D}{t_{DU}}, \quad (2.26)$$

$$P_D = \frac{p_D}{p_{DU}}, \quad (2.27)$$

$$R_D = \frac{\rho_D}{\rho_{DU}}. \quad (2.28)$$

² Bezrozměrná veličina se získá tak, že se rozměrová veličina dělí některou její konstantní charakteristickou hodnotou. Tato hodnota se může volit libovolně podle konkrétních případů.

³ X_M, X_D, Y_M, Y_D jsou bezrozměrné délky, $W_{xM}, W_{xD}, W_{yM}, W_{yD}$ jsou bezrozměrné rychlosti, T_M, T_D jsou bezrozměrné časy, H_D je bezrozměrná výška, P_D je bezrozměrný tlak, R_D je bezrozměrná hustota.

⁴ d_{MU}, d_{DU} jsou charakteristické délky, w_{MU}, w_{DU} jsou charakteristické rychlosti, t_{MU}, t_{DU} jsou charakteristické časy (doby), h_{MU} je charakteristická výška hladiny kapaliny, p_{DU} je charakteristický tlak plynu, ρ_{DU} je charakteristická hustota.

Dosazením výrazů (2.20) až (2.28) do rovnic (2.16) a (2.17) dostaneme bezrozměrovou rovnici kontinuity pro proudění kapaliny

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}} \cdot \frac{\partial H_M}{\partial T_M} + \frac{\partial(H_M \cdot W_{xM})}{\partial X_M} + \frac{\partial(H_M \cdot W_{yM})}{\partial Y_M} = 0 \quad (2.29)$$

a bezrozměrovou rovnici kontinuity pro proudění plynu

$$\frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}} \cdot \frac{\partial R_D}{\partial T_D} + \frac{\partial(R_D \cdot W_{xD})}{\partial X_D} + \frac{\partial(R_D \cdot W_{yD})}{\partial Y_D} = 0. \quad (2.30)$$

Bezrozměrné kritérium

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}} \quad (2.31)$$

je Strouhalovo číslo⁵.

Pohybové rovnice ve směru proudění x_M (pro kapalinu), x_D (pro plyn) se získají dosazením do rovnic (2.14) a (2.15):

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}} \cdot \frac{\partial W_{xM}}{\partial T_M} + W_{xM} \cdot \frac{\partial W_{xM}}{\partial X_M} + W_{yM} \cdot \frac{\partial W_{xM}}{\partial Y_M} = -g \cdot \frac{h_{MU}}{w_{MU}^2} \cdot \frac{\partial H_M}{\partial X_M}, \quad (2.32)$$

$$\frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial T_D} + W_{xD} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial X_D} + W_{yD} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial Y_D} = -\frac{p_{DU}}{\rho_{DU} \cdot w_{DU}^2} \cdot \frac{1}{R_D} \cdot \frac{\partial P_D}{\partial X_D}; \quad (2.33)$$

dosazením do rovnic (2.15 a (2.19) se získají pohybové rovnice ve směru y_M (pro kapalinu), y_D (pro plyn):

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}} \cdot \frac{\partial W_{yM}}{\partial T_M} + W_{xM} \cdot \frac{\partial W_{yM}}{\partial X_M} + W_{yM} \cdot \frac{\partial W_{yM}}{\partial Y_M} = -g \cdot \frac{h_{MU}}{w_{MU}^2} \cdot \frac{\partial H_M}{\partial Y_M}, \quad (2.34)$$

$$\frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial T_D} + W_{xD} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial X_D} + W_{yD} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial Y_D} = -\frac{p_{DU}}{\rho_{DU} \cdot w_{DU}^2} \cdot \frac{1}{R_D} \cdot \frac{\partial P_D}{\partial Y_D}. \quad (2.35)$$

Aby nastala shoda levých stran rovnic kontinuity pro kapalinu a plyn (tj. pro analogické děje), musí platit

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}} = \frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}}, \quad X_M = X_D, \quad Y_M = Y_D, \quad T_M = T_D, \quad W_{xM} = W_{xD}, \quad W_{yM} = W_{yD}, \quad H_M = R_D; \quad (2.36)$$

pro rovnost pravých stran pohybových rovnic musí platit

$$\frac{1}{R_D} \cdot \frac{\partial P_D}{\partial X_D} = a \cdot \frac{\partial R_D}{\partial X_D}, \quad \frac{1}{R_D} \cdot \frac{\partial P_D}{\partial Y_D} = a \cdot \frac{\partial R_D}{\partial Y_D}. \quad (2.37)$$

⁵ Strouhalovo číslo – Strouhalovo kritérium: $Sh = \frac{F_H}{F_S} \approx \frac{\frac{\rho \cdot d_U^3 \cdot w}{t}}{\rho \cdot d_U^2 \cdot w^2} = \frac{d_U}{w \cdot t} = \frac{d_U \cdot f}{w}$.

V konstantě a jsou zahrnuty charakteristické hodnoty obou proudění. Řešením rovnice (2.37) se získá

$$P_D = \frac{a}{2} \cdot R_D^2 + f(T_D). \quad (2.38)$$

Funkce f představuje změnu tlaku v celém rozsahu proudění, závislou pouze na čase. Lze považovat za rovnou nule.

Přejde-li se v rovnici (2.38) k rozměrovým proměnným, dostane se

$$p_D \cdot \rho_D^{-2} = \frac{a}{2} \cdot p_{DU} \cdot \rho_{DU}^{-2} = \frac{g \cdot h_{MU}}{w_{MU}^2} \cdot \frac{\rho_{DU} \cdot w_{DU}^2}{2 \cdot p_{DU}} \cdot p_{DU} \cdot \rho_{DU}^{-2} = \frac{c_{MU}^2}{w_{MU}^2} \cdot \frac{w_D^2}{c_{DU}^2} \cdot \frac{\kappa}{2} \cdot p_{DU} \cdot \rho_{DU}^{-2} \quad (2.39)$$

kde $c_{MU} = \sqrt{g \cdot h_{MU}}$ je rychlost šíření nekonečně malých změn (vln) na hladině kapaliny,

$c_{DU} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p_{DU}}{\rho_{DU}}}$ je rychlost zvuku a κ je adiabatický exponent plynu.

Platí-li rovnice (2.36), je $\frac{c_{MU}}{c_{DU}} \cdot \frac{w_{MU}}{w_{DU}} = 1$, z rovnice (2.39) spolu s původním předpokladem

pohybu bez tření, musí být adiabatický exponent $\kappa = 2$. Rovnice (2.39) je potom rovnicí izoentropie a rovnici (2.35) lze upravit na tvar

$$\frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial T_D} + W_{xD} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial X_D} + W_{yD} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial Y_D} = - \frac{\kappa \cdot p_{DU}}{\rho_{DU}^{\kappa-1}} \cdot \frac{1}{w_{DU}^2} \cdot \frac{\partial R_D}{\partial X_D}. \quad (2.40)$$

Podobná rovnice by byla ve směru osy Y_D .

Bezrozměrné rovnice kontinuity a pohybové rovnice se zjednoduší volbou vhodných charakteristických veličin. Při volbě

$$\frac{d_{MU}}{w_{MU} \cdot t_{MU}}, \quad \frac{d_{DU}}{w_{DU} \cdot t_{DU}}, \quad (2.41)$$

tj. Strouhalova čísla pro kapalinu a pro plyn rovného 1 a charakteristické rychlosti w_{MU}, w_{DU} , rovné rychlosti šíření nekonečně malých změn v místě charakteristické výšky hladiny h_{MU} , resp. a charakteristické hustoty ρ_{DU}

$$w_{MU} = c_{MU} = \sqrt{g \cdot h_{MU}}, \quad w_{DU} = c_{DU} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p_{DU}}{\rho_{DU}}}, \quad (2.42)$$

mají rovnice kontinuity tvar

$$\frac{\partial H_M}{\partial T_M} + \frac{\partial (H_M \cdot W_{xM})}{\partial X_M} + \frac{\partial (H_M \cdot W_{yM})}{\partial Y_M} = 0, \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial R_D}{\partial T_D} + \frac{\partial (R_D \cdot W_{xD})}{\partial X_D} + \frac{\partial (R_D \cdot W_{yD})}{\partial Y_D} = 0, \quad (2.44)$$

pohybové rovnice:

$$\frac{\partial W_{xM}}{\partial T_M} + W_{xM} \cdot \frac{\partial W_{xM}}{\partial X_M} + W_{yM} \cdot \frac{\partial W_{xM}}{\partial Y_M} = -\frac{\partial H_M}{\partial X_M}, \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial W_{yM}}{\partial T_M} + W_{xM} \cdot \frac{\partial W_{yM}}{\partial X_M} + W_{yM} \cdot \frac{\partial W_{yM}}{\partial Y_M} = -\frac{\partial H_M}{\partial Y_M}, \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial W_{xD}}{\partial T_D} + W_{xD} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial X_D} + W_{yD} \cdot \frac{\partial W_{xD}}{\partial Y_D} = -\frac{\partial R_D}{\partial X_D}, \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial W_{yD}}{\partial T_D} + W_{xD} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial X_D} + W_{yD} \cdot \frac{\partial W_{yD}}{\partial Y_D} = -\frac{\partial R_D}{\partial Y_D}. \quad (2.48)$$

Pro okraje proudění geometricky podobné, bezrozměrové počáteční a okrajové podmínky příslušných veličin – viz (2.36) – jsou rovnice (2.43) a (2.44) a rovnice (2.45) až (2.48) podobné. Soustavy rovnic (2.43) a (2.45),(2.46) a rovnic (2.44) a (2.47), (2.48) mají stejná řešení, čímž je analogie mezi prouděním tenké vrstvy kapaliny a dvojrozměrným prouděním plynu potvrzena.

Rychlost proudění kapaliny je úměrná rychlosti proudění plynu, výška hladiny kapaliny je úměrná hustotě plynu a vzhledem k rovnici (2.39) i teplotě plynu a druhá mocnina výšky hladiny je úměrná tlaku plynu.

Zavede-li se v obou prouděních Machovo číslo⁶ jako poměr rychlost proudění k rychlosti šíření nekonečně malých změn v daném místě (pro kapalinu), a poměr rychlost proudění k rychlosti zvuku (pro plyn), dostane se analogie Machových čísel:

$$Ma_M = \frac{w_M}{c_M} = \frac{\sqrt{w_{xM}^2 + w_{yM}^2}}{\sqrt{g \cdot h_M}} \Rightarrow Ma_M^2 = \frac{w_{xM}^2 + w_{yM}^2}{g \cdot h_M}, \quad (2.49)$$

$$Ma_D = \frac{w_D}{c_D} = \frac{\sqrt{(w_{xD})^2 + (w_{yD})^2}}{\sqrt{\frac{\kappa_D \cdot p_D}{\rho_D}}} \Rightarrow Ma_D^2 = \frac{(w_{xD})^2 + (w_{yD})^2}{\frac{\kappa_D \cdot p_D}{\rho_D}}. \quad (2.50)$$

V tabulce č.1 je uveden přehled odpovídajících si veličin obou médií.

2.1.4 Modelová měřítka

Modelová měřítka jsou dána poměrem libovolných dvou odpovídajících si hodnot obou proudění.

$$\text{Měřítka délek: } \gamma_L = \frac{d_M}{d_D}, \quad (2.51)$$

⁶ Machovo číslo – Machovo kritérium: $Ma = \frac{\sqrt{F_s}}{\sqrt{F_p}} \approx \sqrt{\frac{\rho \cdot d_u^2 \cdot w^2}{\rho \cdot d_u^2 \cdot c^2}} = \frac{w}{c}$.

Tabulka 1 Analogie kapalina (model) – plyn (dílo) – [4]

	kapalina (model)	plyn (dílo)	analogie
rozměr	$X_M = \frac{x_M}{d_{MU}}$ $Y_M = \frac{y_M}{d_{MU}}$	$X_D = \frac{x_D}{d_{DU}}$ $Y_D = \frac{y_D}{d_{DU}}$	$X_M = X_D$ $Y_M = Y_D$
rychlost	$W_{xM} = \frac{w_{xM}}{w_{MU}}$ $W_{yM} = \frac{w_{yM}}{w_{MU}}$	$W_{xD} = \frac{w_{xD}}{w_{DU}}$ $W_{yD} = \frac{w_{yD}}{w_{DU}}$	$W_{xM} = W_{xD}$ $W_{yM} = W_{yD}$
čas	$T_M = \frac{t_M}{t_{MD}}$	$T_D = \frac{t_D}{t_{DU}}$	$T_M = T_D$
výška hladiny / hustota plynu	$H_M = \frac{h_M}{h_{MU}}$	$R_D = \frac{\rho_D}{\rho_{DU}}$	$H_M = R_D$
výška hladiny / teplota	$H_M = \frac{h_M}{h_{MU}}$	$\Theta = \frac{g_D}{g_{DU}}$	$H_M = \Theta_D$
2. mocnina výšky hladiny / tlak plynu	$H_M^2 = \left(\frac{h_M}{h_{MU}} \right)^2$	$P_D = \frac{p_D}{p_{DU}}$	$H_M^2 = P_D$
rychlost šíření nekonečně malých změn v místě cha- rakteristické výšky hladiny / charakteristické hustoty	$c_{MU} = \sqrt{g \cdot h_{MU}}$	$c_{DU} = \sqrt{\frac{\kappa_D \cdot p_{DU}}{\rho_{DU}}}$	$c_{MU} = c_{DU}$
zvolené hodnoty	$\frac{d_{MU}}{c_{MU} \cdot t_{MU}} = 1$	$\frac{d_{DU}}{c_{DU} \cdot t_{DU}} = 1$	$\frac{d_{MU}}{c_{MU} \cdot t_{MU}} = \frac{d_{DU}}{c_{DU} \cdot t_{DU}}$
Machovo číslo	$Ma_M = \frac{w_M}{\sqrt{g \cdot h_M}}$	$Ma_D = \frac{w_D}{\sqrt{\frac{\kappa_D \cdot p_D}{\rho_D}}}$	$Ma_M = Ma_D$

$$\text{měřítko rychlostí: } \gamma_W = \frac{w_M}{w_D}, \quad (2.52)$$

$$\text{měřítko času: } \gamma_T = \frac{t_M}{t_D}. \quad (2.53)$$

Měřítka rychlostí (γ_W) lze určit jako poměr charakteristických rychlostí; ty byly zvoleny jako rovné rychlostem šíření malých rozruchů při charakteristické výšce hladiny, resp. při charakteristické hustotě:

$$\gamma_W = \frac{c_{MU}}{c_{DU}} = \frac{\sqrt{g \cdot h_{MU}}}{\sqrt{\frac{\kappa \cdot p_{DU}}{\rho_{DU}}}}. \quad (2.54)$$

Měřítka času (γ_T) je vázáno s měřítkem délky (γ_L) a rychlosti (γ_W) vztahem

$$\gamma_T = \frac{\gamma_L}{\gamma_W}. \quad (2.55)$$

Ten plyne z rovnic (2.20) až (2.28) a (2.31). Analogie je tedy jednoznačně určena volbou dvou ze tří měřítek.

2.1.5 Analogie protékajících množství

Analogická proudění kapaliny a plynu byla definována v předcházejících kapitolách. V rovině $x_M y_M$ proudění kapaliny je dána křivka s definovanou rovnicí $s_M(x_M, y_M, t_M) = 0$, analogická geometricky podobná křivka v proudění plynu bude mít rovnici $s_D(x_D, y_D, t_D) = 0$.

Objemové množství kapaliny $\dot{V}_M (m^3)$, které proteče válcovou plochou, vztyčenou kolmo k rovině $x_M y_M$ nad křivkou s_M v časovém intervalu (t_{M1}, t_{M2}) je rovno

$$\begin{aligned} V_M &= \int_{t_{M1}}^{t_{M2}} \left[\int_{s_M} (w_{yM} \cdot h_M \cdot dx_M - w_{xM} \cdot h_M \cdot dy_M) \right] dt_M = \\ &= t_{MU} \cdot c_{MU} \cdot h_{MU} \cdot l_{MU} \cdot \int_{T_{M1}}^{T_{M2}} \left[\int_{s_M} (W_{yM} \cdot H_M \cdot dX_M - W_{xM} \cdot H_M \cdot dY_M) \right] dT_M. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Dvojrozměrné proudění plynu si lze představit jako proudění plynu mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o z_{DU} . Hmotnost plynu $m_D (kg)$, která proteče v odpovídajícím časovém intervalu (t_{D1}, t_{D2}) válcovou plochou, vztyčenou na křivkou s_D

$$\begin{aligned} m_D &= z_{DU} \int_{t_{D1}}^{t_{D2}} \left[\int_{s_D} (w_{yD} \cdot \rho_D \cdot dx_D - w_{xD} \cdot \rho_D \cdot dy_D) \right] dt_D = \\ &= z_{DU} \cdot t_{DU} \cdot c_{DU} \cdot \rho_{DU} \cdot l_{DU} \cdot \int_{T_{1D}}^{T_{2D}} \left[\int_{s_D} (W_{yD} \cdot R_D \cdot dX_D - W_{xD} \cdot R_D \cdot dY_D) \right] dT_D. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Bezrozměrové integrály ve výrazech (2.56) a (2.57) si musí být rovny, protože proudění jsou analogická a odpovídající si bezrozměrné veličiny mají stejnou hodnotu. Porovnáním výrazů (2.56) a (2.57) se dostane

$$m_D = V_M \cdot \frac{z_{DU} \cdot t_{DU} \cdot c_{DU} \cdot \rho_{DU} \cdot d_{DU}}{t_{MU} \cdot c_{MU} \cdot h_{MU} \cdot d_{MU}}. \quad (2.58)$$

Poměry charakteristických veličin v této rovnici můžeme vyjádřit modelovými měřítky (2.51) až (2.53) a (2.55):

$$m_D = V_M \cdot \frac{z_{DU}}{\gamma_L^2} \cdot \frac{\rho_{DU}}{h_{MU}}. \quad (2.59)$$

Objemové množství kapaliny, protékající modelem, je přímo úměrné analogické hmotnosti protékajícího plynu.

2.1.6 Analogie vodního skoku a rázové vlny

Proudí-li kapalina s malou výškou hladiny po vodorovném dně kanálu rychlostí větší než je lokální rychlost šíření malých hladinových vln může docházet ke vzniku vodního skoku. (Rychlost šíření malých hladinových vln je v ideálním případě dána výrazem $c = \sqrt{g \cdot h}$). Při něm se zvyšuje výška vodní hladiny a klesá rychlost. Při proudění plynu rychlostí větší než je lokální rychlost zvuku, může nastat podobný jev (potvrzeno analogií diferenciálních rovnic), při němž vznikají rázové vlny – [2], [4]. Analogie mezi vodním skokem a rázovými vlnami není úplně přesná, protože energetická bilance vznikajícího vodního skoku a rázové vlny není analogická.

Zjednodušené rovnice popisu vodního skoku pro případ šikmého vodního rázu byly odvozeny při zanedbání vlivu vertikální rychlosti, viskozity a povrchového napětí. Jeho zvláštnosti lze schematicky znázornit – viz Obr. 3. Proud mění skokem svůj původní směr o úhel α , rovina skoku svírá s původním směrem proudu úhel β .

Rovnice kontinuity

$$h_{M1} \cdot w_{Mn1} = h_{M2} \cdot w_{Mn2}, \quad (2.60)$$

zákon zachování hybnosti ve směru kolmém k rovině vodního skoku

$$\frac{g \cdot h_{M1}^2}{2} + h_{M1} \cdot w_{Mn1}^2 = \frac{g \cdot h_{M2}^2}{2} + h_{M2} \cdot w_{Mn2}^2 \quad (2.61)$$

a zákon zachování hybnosti ve směru rovnoběžném s rovinou vodního skoku

$$h_{M1} \cdot w_{Mn1} \cdot w_{Mt1} = h_{M2} \cdot w_{Mn2} \cdot w_{Mt2}. \quad (2.62)$$

Součet kinetické a potenciální energie před vodním skokem a za ním neplatí, protože během skoku dochází k disipaci energie.

Z rovnic (2.60) a (2.62) přímo plyne:

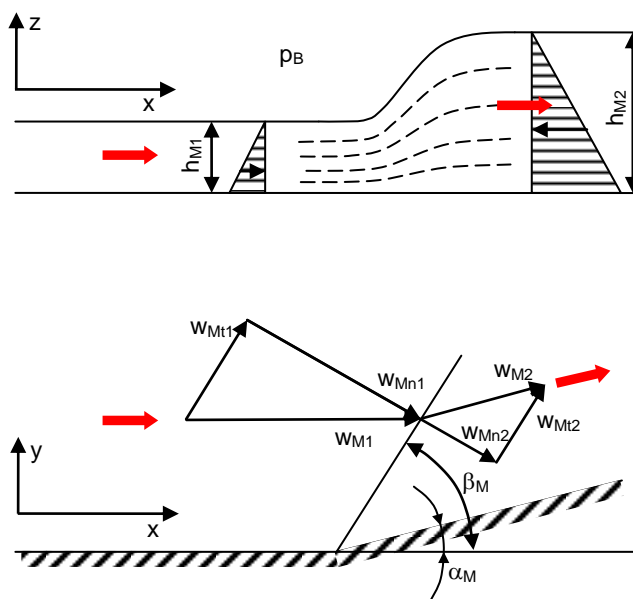
$$w_{Mt1} = w_{Mt2} = w_{Mt}. \quad (2.63)$$

V analogickém proudění plynu platí při použití stejného indexování rovnice:

$$\rho_{D1} \cdot w_{Dn1} = \rho_{D2} \cdot w_{Dn2}, \quad (2.64)$$

$$\rho_{D1} + \rho_{D1} \cdot w_{Dn1}^2 = \rho_{D2} + \rho_{D2} \cdot w_{Dn2}^2, \quad (2.65)$$

$$\rho_{D1} \cdot w_{Dn1} \cdot w_{Dt1} = \rho_{D2} \cdot w_{Dn2} \cdot w_{Dt2} \quad (2.66)$$



Obr. 3 Schematické znázornění šikmého vodního skoku - [3]

V dolní části obrázku je pohled shora. α_M je úhel odklonu proudu od původního směru, β_M je úhel mezi rovinou skoku a původním směrem proudu, w_{M1}, w_{M2} jsou rychlosti proudu, indexy značí stav před skokem a za ním, w_{Mn1}, w_{Mn2} jsou složky rychlosti proudu, kolmé na rovinu skoku, w_{Mt1}, w_{Mt2} jsou složky rychlosti proudu, rovnoběžné s rovinou skoku.

Ve smyslu hydrodynamické analogie odpovídají rovnice (2.64), (2.64) a (2.66) rovnicím (2.60), (2.61) a (2.62).

Podobně platí také

$$w_{Dt1} = w_{Dt2} = w_{Dt} \quad (2.67)$$

Dosazením do rovnice (2.65) se vyjádří zákon zachování energie:

$$i_{D1} + \frac{w_{Dn1}^2}{2} = i_{D2} + \frac{w_{Dn2}^2}{2} \quad (2.68)$$

Považuje-li se proudění před rázem i za ním za izoentropické, lze pro ideální plyn rovnici (2.68) napsat

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_{D1}}{\rho_{D1}} + \frac{w_{Dn1}^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_{D2}}{\rho_{D2}} + \frac{w_{Dn2}^2}{2} \quad (2.69)$$

Pro proudění kapaliny i plynu lze z rychlostních trojúhelníků – viz obrázek č. Obr. 3 – odvodit následující analogické vztahy:

$$\sin \beta_M = \frac{w_{Mn1}}{w_{M1}}, \quad \sin \beta_D = \frac{w_{Dn1}}{w_{D1}}, \quad (2.70)$$

$$\sin(\beta_M - \alpha_M) = \frac{w_{Mn2}}{w_{M2}}, \quad \sin(\beta_D - \alpha_D) = \frac{w_{Dn2}}{w_{D2}}, \quad (2.71)$$

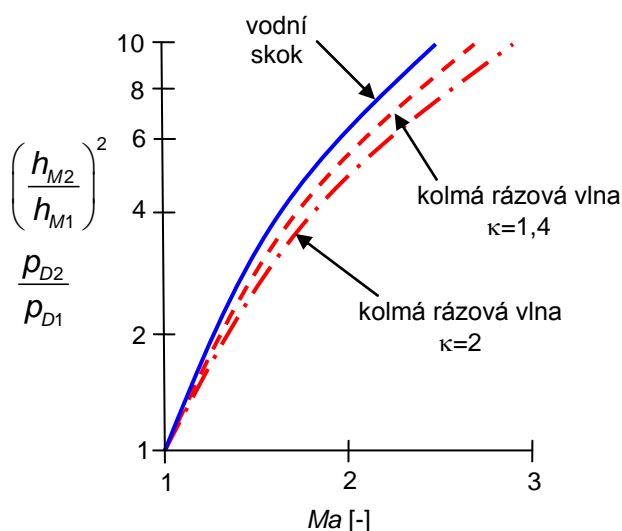
$$w_{Mt} = w_{M1} \cdot \cos \beta_M = w_{M2} \cdot \cos(\beta_M - \alpha_M), \quad w_{Dt} = w_{D1} \cdot \cos \beta_D = w_{D2} \cdot \cos(\beta_D - \alpha_D) \quad (2.72)$$

Je-li v případě vodního skoku dána rychlost w_{M1} , výška hladiny h_{M1} a úhel α_M směru proudu za skokem, je rovnicemi (2.60), (2.61), (2.62) a (2.70), (2.71), (2.72) určena rychlost w_{M2} za skokem a úhel skoku β_M . Tato závislost je velmi komplikovaná, uvádí se ve formě nomogramu (Preiswerkův diagram poláry vodního skoku) – [3].

V případě kolmé rázové vlny v plynu platí vedle rovnic analogických vodnímu skoku energetické rovnice (2.69). Úplná analogie mezi kolmou rázovou vlnou a vodním skokem je proto možná jen v mezním případě, kdy $\frac{\rho_{D1}}{\rho_{D2}} = \frac{h_{M1}}{h_{M2}} = 1$, tj. pro nekonečně slabý ráz. S rostoucí intenzitou rázu se odchylka zvětšuje. Stejně jako pro vodní skok existují diagramy také pro kolmou rázovou vlnu (Busemannův diagram) – [2].

Na obrázku č.Obr. 4 je pro ilustraci uvedeno porovnání odpovídajících si teoretických hodnot přímého vodního skoku a kolmé rázové vlny v závislosti na Machově čísle.

Ve skutečném vodním skoku jsou vlivem vertikální rychlosti, viskozity a povrchového napětí mnohem složitější poměry než vyjadřuje matematický popis. Proto je i vzhled vodního skoku odlišný od rázové vlny: zatímco šířka rázové vlny je velmi malá, šířka vodního skoku je značná. Před vodním skokem předbíhají velmi krátké kapilární vlny. Tyto vlny přebírají část disipované energie. Při malých skocích vlivem vertikální rychlosti a povrchového napětí nedochází k porušení hladiny a skok vytváří plynulou vlnu. Při velkých skocích vzniká vodní válec, v němž disipuje většina ztracené mechanické energie.



Obr. 4 Porovnání přímého vodního skoku a kolmé rázové vlny – [5].

2.1.7 Chyby hydrodynamické analogie

Hydrodynamická analogie rovinného izoentropického proudění plynu je pouze přibližná, je třeba volit takové experimentální metody, aby byly chyby zanedbatelné. Není-li to možné, musí se stanovit příslušné korekce – [6], [7].

Největší chybu způsobuje to, že v hydrodynamické analogii modelujeme hypotetický plyn s adiabatickým exponentem $\kappa = 2$. Ukazuje se, že při podzvukovém proudění lze vliv adiabatického exponentu na Machovo číslo prakticky zanedbat. Pro proudění transsonické a nadzvukové byly vypracovány přibližné metody výpočtů – [6].

Další chyby mají původ ve zjednodušených předpokladech, za nichž byly podmínky analogie odvozeny. Je to hlavně předpoklad, že se hladinové vlny o malé amplitudě šíří rychlostí $c = \sqrt{g \cdot h}$, a že lze zanedbat vliv viskozity.

2.1.7.1 Chyby způsobené disperzí hladinových vln

Disperze hladinových vln je závislost rychlosti vlny na vlnové délce. Pokud se vlny různých vlnových délek šíří daným prostředím různě rychle, dochází k postupné změně tvaru vlnového balíku (je tvořen vlnami s podobnými frekvencemi a vlnovými délkami).

Hladinové vlny o velmi malé amplitudě se šíří rychlostí

$$c = \left[\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma}{\lambda \cdot \rho} + \frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi} \right) \cdot t \cdot h \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.73)$$

kde λ je vlnová délka a σ povrchové napětí vody. Je-li $\lambda \gg h$, potom

$$t \cdot h \cdot (2 \cdot \pi \cdot h \cdot \lambda^{-1}) = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \lambda^{-1}. \quad (2.74)$$

Zanedbá-li se člen, obsahující σ , šíří se hladinové vlny rychlostí nezávisle na λ , tedy přibližně $c = \sqrt{g \cdot h}$. Za tohoto předpokladu byly odvozeny podmínky hydrodynamické analogie, jenže v praktickém provozu analogie se vyskytují vlny, jejichž rychlost na λ závisí. Jsou to zejména vlny, způsobené celým obtékaným tělesem a krátké Machovy vlny, způsobené například nerovnostmi obtékaného povrchu v nadkritické oblasti.

Zanedbává se:

- *povrchové napětí $\sigma = 0$; vliv povrchového napětí se snižuje přidáním vhodných tenzidů – smáčedel, anebo se místo vody použije kapalina s menším povrchovým napětím (například petrolej),*
- *disperze vodních vln $w \neq f(\lambda)$; v případě velmi malé vrstvy vody ($h \leq 6\text{mm}$) nevystupuje žádná disperze – prakticky se pracuje s výškami vyššími, aby byly chyby, vyvolané mezní vrstvou malé,*
- *změna složky rychlosti s časem $\frac{dw}{d\tau}$ při proudění vodní hladiny; je dobře splnitelné jen pro malé výšky vody ($h \leq 6\text{mm}$),*
- *mezi kolmou rázovou vlnou a vodním skokem není žádná exaktní analogie; vodní skok má za následek ztrátu energie, ale v plynu je při kolmé rázové vlně konstantní entalpie. Hustota i čas jsou proporcionální – při kolmé rázové vlně se ale hustota mění, zatímco čas zůstává konstantní. Vliv je zanedbatelný při Machově čísle $Ma < 1,5$.*

2.1.7.2 Chyby způsobené vazkostí

Při proudění malé vrstvy vody po rovinném dně se u dna vytváří mezní vrstva, která nemá žádný analogon v proudění plynu bez tření.

Opatření pro snížení vlivu mezní vrstvy:

- *naklonění dna kanálu,*

- *mezní vrstva se odsaje – s velkou přesností je proveditelné jen u velkých vodních výšek $h > 10 \text{ mm}$.*

K posouzení profilové mezní vrstvy (odtržení, ztráty) by se musela shodovat Reynoldsova čísla⁷ jak v plynném tak i ve vodním proudu. Protože jsou rychlosti v kapalině řádově 1000x menší než v plynu a kinematická viskozita kapaliny je 10x menší než plynu, musely by být odpovídající délky asi 100x větší, a to je prakticky neproveditelné. Ke zmenšení rozdílu Reynoldsových čísel mohou být použity tekutiny s menší vazkostí a rozměr modelu ve směru proudění by měl být co největší.

2.1.7.3 Vlastní chyby měření

Vlastní chyby měření lze ve většině případů určit pouze odhadem; jsou dány zkušenostmi z předcházejících experimentů, použitými měřidly, údaji výrobců v manuálech přístrojů a metodami kalibrování.

Jako příklad může posloužit měření výšky hladiny vody při ustáleném proudění. Tuto hodnotu lze měřit dotykovým hrotem s přesností 0,1mm (chyba $\approx 1\%$), omývací metodou (model se natře barvou, která se při proudění smývá do výšky, odpovídající výšce vrstvy vody), fotografováním nebo opticky (chyba ≈ 5 až 10%) a podle stanovených cílů disertační práce nově zkonstruovaným snímačem výšky hladiny, který měří s přesností 0,01mm (chyba $\approx 0,1\%$). Celý název je „Snímač hladiny elektricky vodivé kapaliny, zejména výšky hladiny a frekvence jejího kmitání“ – [A21]

2.1.7.4 Chyby a nejistoty měření

Na základě doporučení „Mezinárodního výboru pro míry a váhy“ byl zaveden nový pojem pro vyjadřování odchylek v technických měřeních. Pojem „chyba“ je nahrazen „nejistotou měření“. Důvodem je skutečnost, že chyba měření byla chápána jako odchylka naměřené hodnoty od správně naměřené hodnoty. V principu však „správnou“ hodnotu určit nelze. Nejistota měření je stanovena jako určité toleranční pásmo v okolí nejpravděpodobnější hodnoty měřené veličiny – [37]. Stanovit nejistoty měření lze statistickými metodami, nebo metodami, zmíněnými v kapitole 2.1.7.3.

2.2 Modelová kapalina

Hydrodynamická analogie, odvozená v předcházejících kapitolách platí pro ideální kapalinu. Její pohyb popisují Eulerovy rovnice (2.4), (2.5) a (2.6) a rovnice kontinuity (2.3).

Pro skutečnou (newtonskou) kapalinu je obecná rovnice kontinuity stejná, místo Eulerových rovnic platí Navier-Stokesovy, v nichž přibyl člen, zahrnující vliv viskozity. Zavede-li se pravoúhlý souřadný systém x_M, y_M, z_M , kde záporná osa z_M má směr tíhového zrychlení g , mají tyto rovnice tvar:

$$\frac{\partial w_{xM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{xM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial x_M} + \frac{\eta_M}{\rho_M} \cdot \left[\frac{\partial^2 w_{xM}}{\partial x_M^2} + \frac{\partial^2 w_{xM}}{\partial y_M^2} + \frac{\partial^2 w_{xM}}{\partial z_M^2} \right] \quad (2.75)$$

⁷ Reynoldsovo číslo – Reynoldsovo kritérium: $Re = \frac{F_s}{F_\tau} \approx \frac{\rho \cdot d_U^2 \cdot w^2}{\eta \cdot w \cdot d_U} = \frac{\rho \cdot d_U \cdot w}{\eta} = \frac{d_U \cdot w}{\nu}$.

$$\frac{\partial w_{yM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{yM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial y_M} + \frac{\eta_M}{\rho_M} \cdot \left[\frac{\partial w_{yM}^2}{\partial x_M^2} + \frac{\partial w_{yM}^2}{\partial y_M^2} + \frac{\partial w_{yM}^2}{\partial z_M^2} \right] \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial w_{zM}}{\partial t_M} + w_{xM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial x_M} + w_{yM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial y_M} + w_{zM} \cdot \frac{\partial w_{zM}}{\partial z_M} = -\frac{1}{\rho_M} \cdot \frac{\partial p_M}{\partial z_M} - g + \frac{\eta_M}{\rho_M} \cdot \left[\frac{\partial w_{zM}^2}{\partial x_M^2} + \frac{\partial w_{zM}^2}{\partial y_M^2} + \frac{\partial w_{zM}^2}{\partial z_M^2} \right] \quad (2.77)$$

Pro hydrodynamické analogové zařízení je proto z hlediska viskozity nejvhodnější kapalina s co nejnižší kinematickou viskozitou ν .

Povrchové napětí vznikající vlivem molekulárních sil způsobuje, že se povrchová vrstva chová jako velmi tenká rovnoměrně napjatá blána. Jestliže není hladina rovinná, není tlak těsně pod hladinou stejný jako vnější atmosférický tlak, ale je zvýšen o tlak ve směru normály (normálový tlak p_n závisí na povrchovém napětí a na zakřivení hladiny v daném místě). Ze strany volné hladiny působí celkový tlak, odpovídající $p_B + p_n$. Povrchové napětí způsobuje také to, že se na fázovém rozhraní vytváří meniskus, který může v některých případech znemožnit přiblížení vizualizačních částic do těsné blízkosti obtékaného tělesa.

Při volbě modelové kapaliny je v souladu s hydrodynamickou analogií žádoucí, aby se proudění skutečné kapaliny co nejvíce blížilo proudění ideální kapaliny. Tento požadavek se hodnotí z hlediska viskozity a povrchového napětí – [4] poměry

$$\left(\frac{\eta}{\rho} = \nu \right) \text{ a } \left(\frac{\sigma}{\rho} \right) \quad (2.78) \text{ a } (2.79)$$

V tabulce č. Tabulka 2 jsou uvedeny vybrané látky, jichž by mohlo být použito pro hydrodynamickou analogii. Jsou seřazeny podle zmíněných kritérií, a to v první řadě podle viskozity, ve druhé řadě podle povrchového napětí. V tabulce je také poznámka o míře odpařivosti, vztažené k éteru a rizikové faktory – [4], [8]. Z tabulky je zřejmé, že většina z uvedených látek má pro účely hydrodynamické analogie lepší vlastnosti než voda. Přesto je nejpožívanějším médiem právě voda, a to kvůli snadné dostupnosti, ceně a bezpečnosti.

2.2.1 Voda

Odběr vody pro experimenty se provádí z vodovodního řádu, v němž v průběhu roku kolísá teplota. Podle prováděných měření se teplota pohybuje v rozmezí od 8°C (minimum naměřené v zimním období) do 15°C (letní maximum). Jak bylo uvedeno v předcházejícím odstavci, v hodnocení modelové kapaliny hraje významnou roli viskozita, povrchové napětí a hustota, což jsou veličiny, které závisí na teplotě. V následujících grafech – grafu č. 1, 2 a 3 – jsou diagramy teplotních závislostí sledovaných veličin.

Je v nich vyznačen rozsah teplot při experimentech a s ním související difference závislých veličin. Kromě toho jsou schematicky znázorněny určující hodnoty jednotlivých veličin, odpovídající určující teplotě $\vartheta_U = 11,5^\circ\text{C}$ (průměr letního 15°C a zimního 8°C extrémů). Jedná se o určující kinematickou viskozitu ν_U , určující povrchové napětí σ_U a určující hustotu ρ_U . V legendách obrázků jsou difference veličin, vztažené k teplotnímu rozdílu 7°C . Je třeba vzít v úvahu skutečnost, že hodnoty povrchového napětí a viskozity jsou v řádech 10^{-4} a 10^{-6} .

Kinematická viskozita vody se snižuje s klesající teplotou⁸ – [9], pro určující teplotu $\vartheta_U = 11,5^\circ\text{C}$ má hodnotu $\nu_U = 1,255 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Průběh závislosti $\nu - \vartheta$ obsahuje graf č.1.

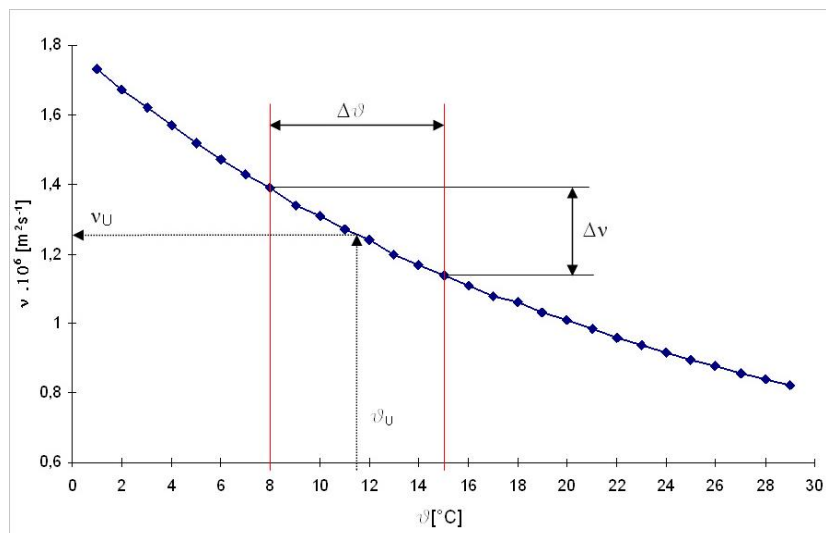
Tabulka 2 Hodnocení dokonalosti vybraných kapalin z hlediska viskozity a povrchového napětí při teplotě 20°C

rizikové faktory: ■ hořlavina, ■ výbušnina, ■ zdravotní riziko, ■ ekologické riziko

kapalina při 20°C	$\rho \cdot 10^{-3}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\eta \cdot 10^4$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\sigma \cdot 10^4$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\frac{\eta}{\rho} (= \nu) \cdot 10^6$	$\frac{\sigma}{\rho} \cdot 10^5$	poměrná odpařivost (ether=1)	rizika
rtuť	13,546	15,54	47,500	0,115	3,51		■ ■
diethylether (éter)	0,713	2,44	1,649 proti nasy- ceným pa- rám	0,342	2,31	1	■ ■ ■
aceton	0,791	3,16	2,568	0,399	3,25	2,1	■ ■
tetrachlor- methan (tetrachlór)	1,594	9,65	2,568 proti nasy- ceným pa- rám	0,605	1,61	3	■ ■
methyl- benzen (toluen)	0,867	6,20	2,853	0,715	3,29	6,1	■ ■
voda	0,998	10,50	7,275	1,007	7,29		
etylalkohol (líh)	0,789	12,20	2,230	1,546	2,83	8,3	■
petrolej	0,773	21,00	2,396	2,72	3,10		■

⁸ Kinematická viskozita je podíl dynamické viskozity

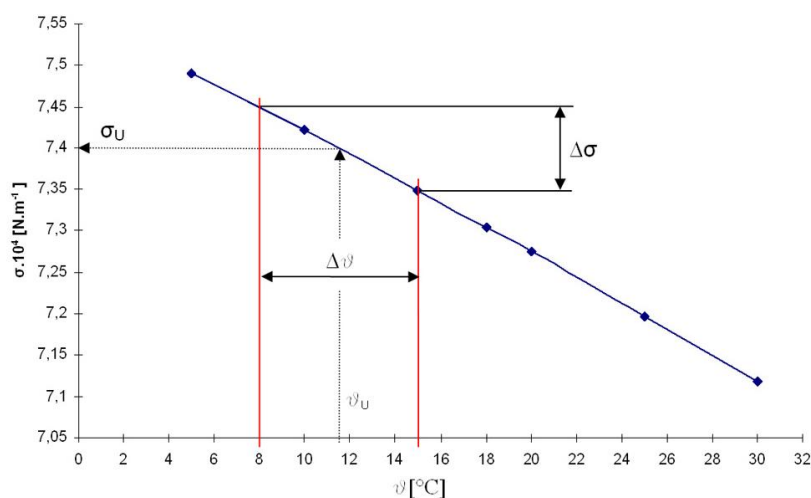
$\log \eta = -13,73 + \frac{1,828}{T} + 1,966 \cdot 10^{-6} \cdot T - 14,66 \cdot 10^{-9} \cdot T^2$ a hustoty.



Graf 1 Závislost kinematické viskozity vody ν na teplotě ϑ (při tlaku $p_B=0,1013 \text{ MPa}$) – [9]

$\Delta\vartheta = 7^\circ\text{C}$ je rozsah teplot při experimentech, $\Delta\nu = 0,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ je difference kinematické viskozity, ϑ_U je určující teplota, ν_U je určující viskozita.

Povrchové napětí kapalin klesá s klesající teplotou, při kritické teplotě je rovno nule. Nejznámější vztah, vyjadřující závislost povrchového napětí na teplotě je Eötvösova rovnice⁹ – [39]. Povrchové napětí vody pro určující teplotu $\vartheta_U = 11,5^\circ\text{C}$ je $\sigma_U = 7,40 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. Průběh závislosti ($\sigma - \vartheta$) obsahuje graf č.2.

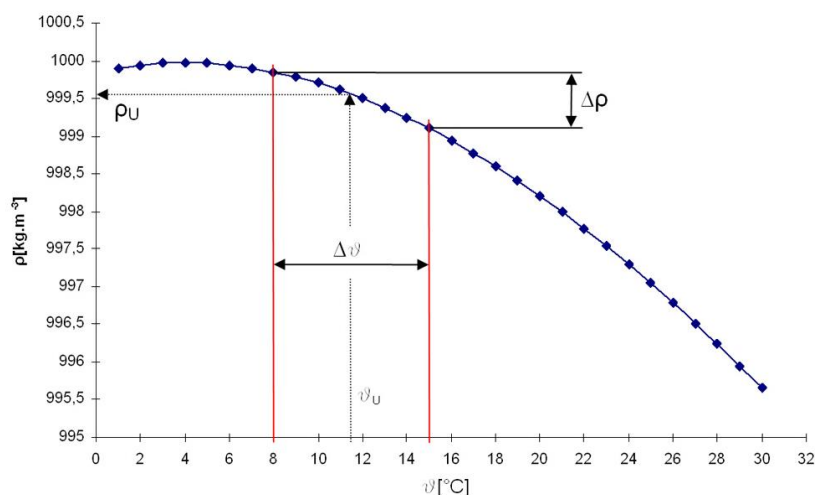


Graf 2 Závislost povrchového napětí vody σ na teplotě ϑ – [40]

$\Delta\vartheta = 7^\circ\text{C}$ je rozsah teplot při experimentech, $\Delta\sigma = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ je difference povrchového napětí, ϑ_U je určující teplota, σ_U je určující povrchové napětí.

⁹ Nejčastěji používaný tvar Eötvösovy rovnice: $\sigma \cdot \left(\frac{M}{\rho_l - \rho_g} \right)^{\frac{2}{3}} = k \cdot (\vartheta_{kr} - \vartheta)$, kde M je molární hmotnost kapaliny, ρ_l je hustota kapaliny, ρ_g je hustota rovnovážné fáze, k je empirická hodnota (přibližná hodnota pro nepolární látky je $k=2,12 \cdot 10^{-7}$), ϑ_{kr} ... kritická teplota, ϑ ... teplota.

Hustota vody se s teplotou snižuje, závislost $\rho - \vartheta$ zobrazuje graf č.3. Při teplotě 4°C dosahuje hustota maxima, při určující teplotě $\vartheta_U = 11,5^\circ\text{C}$ odpovídá určující hustota $\rho_U = 999,552\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [9]



Graf 3 Závislost hustoty vody ρ na teplotě ϑ – [10], [9]

$\Delta\vartheta = 7^\circ\text{C}$ je rozsah teplot při experimentech, $\Delta\rho = 0,745\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ je difference hustoty, ϑ_U je určující teplota, ρ_U je určující hustota.

2.2.2 Voda s vizualizačními přísadami

Při vizualizaci proudění se do vody přidávají další látky, které se v ní sice nerozpouštějí ani s ní chemicky nereagují, ale jejich přítomnost ovlivňuje stěžejní vlastnosti modelové tekutiny, uvedené v tabulce č. Tabulka 2, tj. hustota a poměry $\left(\frac{\eta}{\rho} = \nu\right)$ a $\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)$.

Přidáním vizualizačních ingrediencí do vody vznikají koloidní systémy. Koloidní systémy jsou soustavy v přírodě velmi rozšířené, ovlivňují zejména meteorologické jevy, ale značný význam mají i v technické praxi. Každá koloidní soustava reprezentuje disperzi jedné hmoty (disperzní fáze) v druhé (disperzní prostředí)¹¹ – [11]. V koloidních systémech probíhají různé děje, nejtypičtějším je koagulace¹². Ostatní procesy nemají v hydrodynamické analogii význam¹³.

Mírou rozptýlení jakékoli disperzní soustavy může být příčný lineární rozměr částice a (u kulových částic průměr, u krychlových částic hrana) nebo jeho převrácená hodnota

¹⁰ Závislost hustoty na teplotě je $\log \rho = 3 + \log 0,3471 - \left(1 - \frac{\vartheta + 273,15}{\vartheta_{kr} + 273,15}\right)^{\frac{2}{7}} \cdot \log 0,274$.

¹¹ Je třeba dodržovat terminologii a nejedná se koloidy, protože v nich jsou dispergovány částicemi molekuly, zatímco v koloidních soustavách jsou jimi agregáty, tj. shluky dispergovaných částic.

¹² Koagulace je spojování agregátů v ještě větší útvary působením mezimolekulárních sil (ne chemických).

¹³ Kromě koagulace mohou nastat i jiné děje, například fyzikální adsorpce, elektroforéza apod. Chemické reakce probíhají pouze při vzájemném působení koagulatoru a stabilizátoru (látky adsorbované na povrchu koloidních částic, zajišťující relativní „agregátní“ stálost soustavy).

$D = \frac{1}{a}$, tzv. stupeň disperzity resp. specifický povrch¹⁴. Všechny tyto veličiny spolu souvisejí. Čím menší je rozměr částic, tím větší je stupeň disperzity nebo specifický povrch a naopak.



Obr. 5 Koagulace částic hliníku v disperzní soustavě černěná voda, smáčedlo a hliníkového prášku

Koloidní systémy se dělí podle skupenství disperzního prostředí a disperzní fáze, podle velikosti částic disperzní fáze, podle struktury disperzního podílu a podle stálosti systému při změně obsahu disperzního prostředí – [12]. Médium tvořené vodou s příměsemi vizualizačních ingrediencí je „hrubě disperzní lyofobní suspenze“¹⁵ – v dalším textu bude užíváno zkráceného pojmu „disperze“.

2.2.2.1 Viskozita koloidních systémů

Viskozita koloidních systémů je svým způsobem zvláštní, a proto je třeba připomenout několik základních informací.

Při laminárním proudění tenké vrstvy kapaliny platí Newtonova definice viskozity, podle které je síla vnitřního tření stejně velká jako síla působící zvenku, ale má opačný směr. Je úměrná ploše S vrstvy, na níž působí a rychlosti smykové deformace, pro rovinné proudění nazývané gradient rychlosti pohybu $\left(\frac{dw}{dz}\right)$ ¹⁶ mezi vrstvami:

$$F_{\tau} = \eta \cdot S \cdot \left(\frac{dw}{dz}\right). \quad (2.80)$$

Laminární proudění kapaliny trubkami popisuje Poiseuilleova rovnice, kde \dot{V} je objemový průtok kapilárou, d je délka kapiláry, r je poloměr kapiláry a Δp je rozdíl tlaků na konci kapiláry:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot r \cdot 4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot d}. \quad (2.81)$$

Rovnice (2.80) a (2.81) platí, pohybuje-li se kapalina v podobě vrstev, které mají různou rychlost a vzájemně se nepromíchávají. Při velkých rychlostech přechází laminární proudění na turbulentní, charakterizované vznikem vírů v pohybující se kapalině. Aplikuje-li

¹⁴ Stupeň disperzity, specifický objem – mezifázová plocha, připadající na jednotku objemu disperzní fáze.

¹⁵ Jedná o koloidní soustavu tuhé látky jako disperzní fáze a kapaliny jako disperzního prostředí (označení systému s/g) s izolovanými částicemi o rozměru $a \gg 10 \mu m$, stálými i při změně obsahu disperzního prostředí.

¹⁶ Gradient rychlosti při rovinném proudění je rychlost smykové deformace.

se na tento případ rovnice (2.80) a (2.81), ztrácí koeficient viskozity svůj obvyklý význam, neboť jeho hodnota při turbulentním proudění nezávisí jen na povaze kapaliny, ale stává se funkcí fluktuací rychlosti kapaliny. V tomto případě se hovoří o efektivní, zdánlivé viskozitě, kterou se rozumí veličina, vypočítaná pro danou rychlosti proudění z rovnic (2.80) a (2.81).

Limitem pro přechod laminárního proudění na turbulentní je hodnota Reynoldsova čísla, jehož hodnota je přímo úměrná rychlosti proudění a charakteristickému rozměru¹⁷ a nepřímo úměrná kinematické viskozitě. Přítomnost částic v koloidním systému, zejména mají-li nepravidelný tvar, napomáhá předčasné turbulenci, k přechodu laminárního proudění na turbulentní dojde při nižších hodnotách.

Koloidní soustavy mají vždy větší viskozitu než čisté disperzní prostředí. Na základě čistě hydrodynamických představ odvodil v roce 1906 Einstein rovnici¹⁸, která vyjadřuje závislost mezi viskozitou soustavy a koncentrací disperzního podílu. Její obecný tvar je

$$\eta_{KS} = \eta \cdot (1 + \xi \cdot \varphi), \quad (2.82)$$

kde η je viskozita disperzního prostředí, ξ je tvarový koeficient dispergovaných částic (pro kulové částice $\xi = 2,5$), φ je objemový zlomek disperzního podílu.

Einsteinova rovnice (2.82) se často přepisuje ve tvaru

$$\frac{\eta_{KS}}{\eta} - 1 = \frac{(\eta_{KS} - \eta)}{\eta} = \xi \cdot \varphi = \xi \cdot \left(\frac{n \cdot V_c}{V_{KS}} \right), \quad (2.83)$$

kde $\frac{\eta_{KS}}{\eta}$ je relativní viskozita, tj. poměr viskozity soustavy a viskozity prostředí, n je celkový počet částic v systému, V_c je objem jedné částice disperzního podílu, V_{KS} je objem koloidního systému.

Ze všeho, co bylo nyní uvedeno, plyne, že podle Einsteina je mezi viskozitou dostatečně zředěné soustavy a obsahem disperzního podílu v ní přímá úměrnost, a že viskozita nezávisí na disperzitě suspenze – [12].

Číselnou hodnotu dynamické viskozity konkrétního koloidního systému voda/hliníkový prach lze určit např. rotačním viskozimetrem, protože potřebná teorie pro výpočet není k dispozici. Přesto lze odhadnout, že dynamická viskozita systému se při rovnoměrném rozptýlení částic ve vodě změní zanedbatelně.

Kinematická viskozita koloidního systému a čisté vody zaznamenají o něco větší, ale přesto zanedbatelnou odchylku, neboť zde hraje roli změna hustoty koloidního systému.

2.2.2.2 Hustota koloidních systémů

Hustota koloidního systému, v němž je disperzním prostředím voda a disperzní fází kovový prach je v porovnání s hustotou čisté vody vyšší. Z hustot složek (vody a hliníku) a z jejich hmotnostních podílů lze stanovit výslednou hustotu systému. Dosazením jednotlivých hustot při teplotě 20°C a jednotlivých hmotností se získá hustota koloidního systému $\rho_{KS} = 998,507 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tj. hodnota vyšší o 0,03%.

¹⁷ Zde rozměru obtékaného modelu, nikoli rozměru částic.

¹⁸ Einsteinova rovnice platí za předpokladu, že částice disperzní fáze jsou tuhá tělesa kulovitěho tvaru, koncentrace disperzního podílu není příliš velká a že mezi částicemi nedochází k žádným interakcím. Dále platí pro nestlačitelnou soustavu a pro proudění laminárního charakteru.

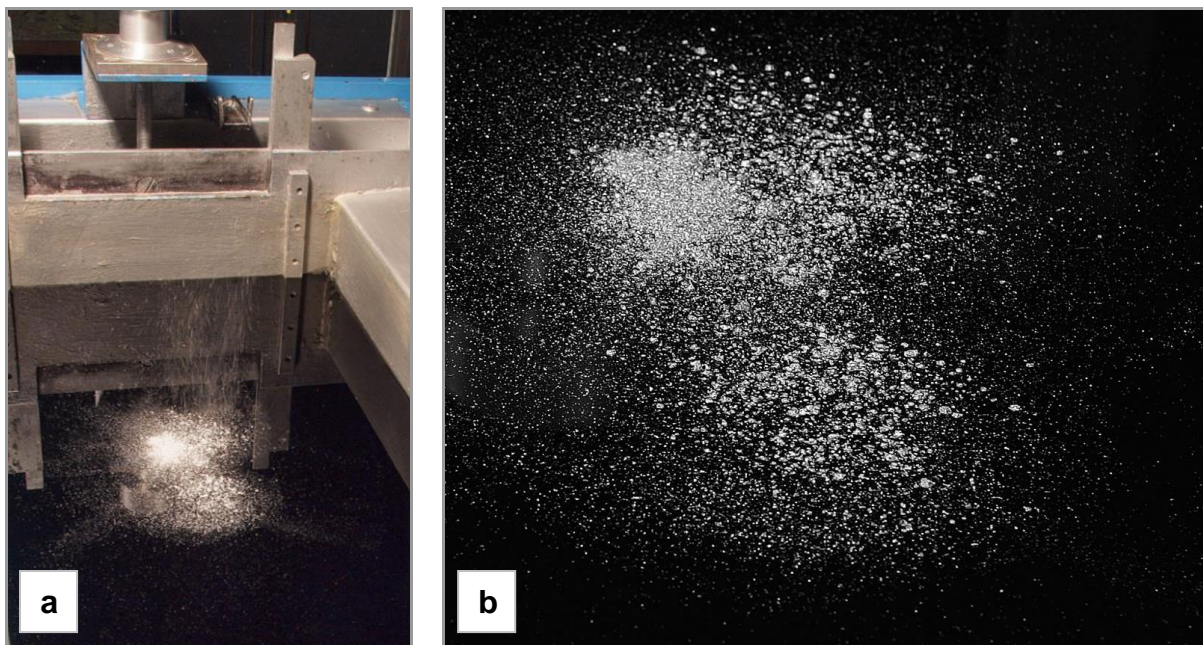
$$\rho_{KS} = \frac{\frac{m_{Al} + m_{H_2O}}{\rho_{Al} + \rho_{H_2O}}}{\frac{m_{Al}}{\rho_{Al}} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}} \quad (2.84)$$

2.2.2.3 Povrchové napětí koloidních systémů

Povrchové napětí koloidního systému voda/kovový prach je tak velké, že znemožňuje rovnoměrné, pro vizualizaci důležité, rozptýlení kovového prachu ve vodě. Na obrázku č. Obr. 6 jsou vidět hromádky hliníkového prachu, vzniklé na pokusu o rovnoměrné pokrytí hladiny. Při pokusu o „rozmíchání“ hromádek klesají shluky částic ke dnu a tam se usazují.

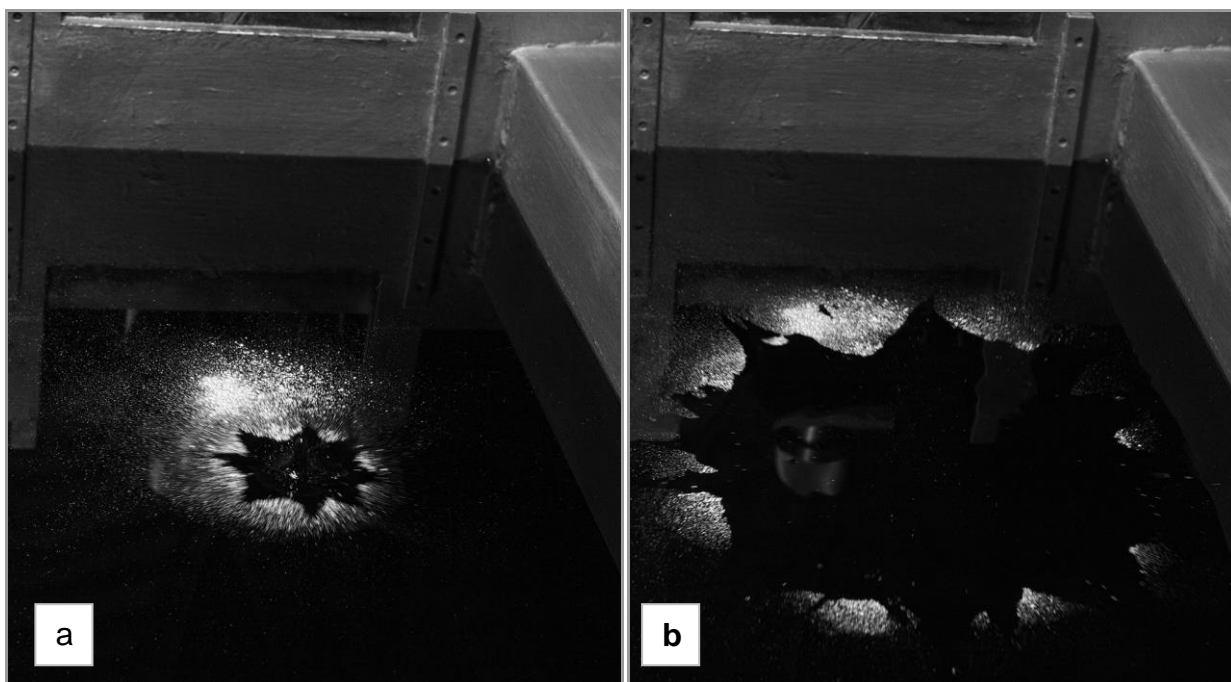
Řešením problému by bylo vytvoření vrstvy na hladině kapaliny tzv. rozestíráním látky, v této kapalině velmi málo rozpustné. Předpokladem je, že látka, na níž má dojít k rozestření vrstvy, má dostatečně velké povrchové napětí, což voda splňuje. Povrchové filmy, rozestírané na površích kapalin, mohou být tvořeny ve vodě nerozpustnými kapalinami i tuhými látkami, ale je třeba je nejdříve rozpustit ve vhodném těkavém rozpouštědle. To se po rozprostření vypaří. Tento způsob řešení by byl akceptovatelný v případě, že by časová prodleva, nutná na vypaření nežádoucích příměsí, neovlivnila experiment. Povrchové napětí není těkavou látkou ovlivněno, protože experiment lze zahájit až po vypaření rozpouštědla.

Jinou možností je nahrazení rozpouštědla povrchově aktivní látkou, která snižuje povrchové napětí. Výhodou je, že experimenty lze provádět ihned, povrchovou vrstvu lze průběžně doplňovat a nižší povrchové napětí znamená menší meniskus poblíž modelů a tím i možnost vizualizačních částic dostat se i do miniaturních mezer. Účinek povrchově aktivní látky, nanesené na hromádku hliníkového prachu je vidět na obrázku č. Obr. 7. Porovnání vzhledu hliníkového prachu, naneseného na hladinu vody v suché formy a hliníkového prachu, naneseného na vodní hladinu nástřikem disperze hliník/voda je na obrázku č. 8.

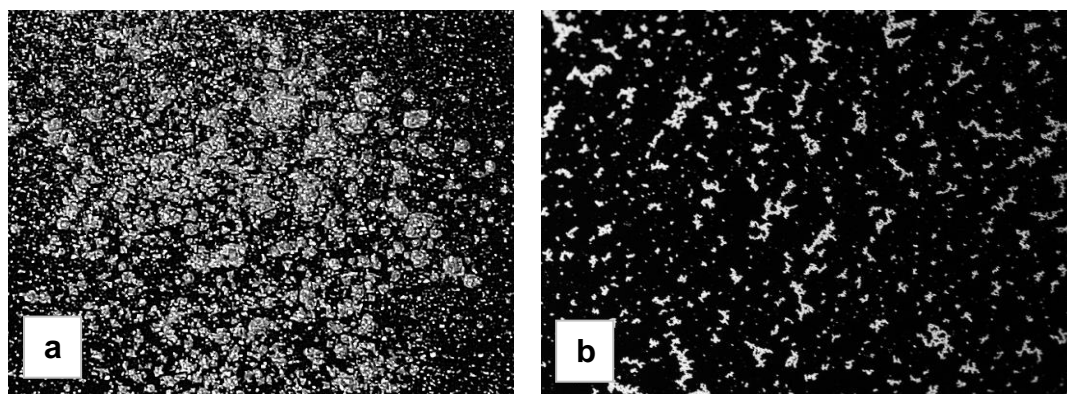


Obr. 6 Vodní hladina s nevhodně naneseným hliníkovým prachem

a) hliníkový prach sypán na hladinu, b) detail hromádky.



Obr. 7 Vodní hladina s hromádkou hliníkového prachu a nanesenou kapkou povrchově aktivní látky
a) fáze dopadu kapky povrchově aktivní látky na hladinu vody, b) okamžitá „reakce“ hliníkového prachu na hladině vody.



Obr. 8 Vodní hladina s hliníkovým práškem na povrchu
a) samotný hliníkový prášek nasypáný na hladinu, b) vodní hladina s disperzní směsí hliníku, vody a povrchově aktivní látky.

3 Metody zviditelnění proudění kapalin

Proudící tekutina je tvořena velkým počtem malých částic o stejných fyzikálních vlastnostech, je tedy možno ji považovat za spojité prostředí. Jednotlivé částice, jejich pohyb nebo seskupování nelze za normálních okolností identifikovat, je třeba je zviditelnit. K tomu účelu se používají vizualizační metody. Vizualizační metody patří do experimentální mechaniky tekutin a používají se ke zviditelnění různých fyzikálních veličin, charakterizujících proudění tekutin – [34]. Vizualizační metody umožňují pozorování jevů v celém sledovaném prostoru najednou, usnadňují odhalení souvislostí a fyzikální podstaty sledovaných jevů či vývoj nestacionárních dějů. Jednotlivými metodami lze získat informace o tvaru proudnic, oblastech úplavu, mechanismech tvoření vírů, odtržení mezní vrstvy apod. Na základě toho pak lze proudění lépe popsat, případně navrhnout způsob vhodné úpravy díla.

Vizualizace se provádí prostřednictvím speciálních látek, které jsou v kontaktu se sledovaným objektem. Chování speciálních látek se pozoruje a zaznamenává, výstupem jsou fotografie nebo videozáznamy. Obrazové informace lze posuzovat vždy kvalitativně, jsou-li k dispozici dobře známé vazby mezi sledovaným objektem a speciální látkou použitou k vizualizaci, lze provést i kvantitativní vyhodnocení sledovaných fyzikálních veličin.

Proudění lze zviditelňovat také optickými metodami, a to buď v celé sledované oblasti najednou (interferometrická vizualizace rozložení teplot v tekutinách, zviditelnění teplot na povrchu těles pomocí termovize) nebo k měření lokálních hodnot fyzikálních veličin (měření rychlostí se provádí metodou LDA) – [13]. Nositelem informace o stavu objektu je světelné či jiné záření, použité pro zkoumání objektu, které je pozměněno v důsledku pozměněných vlastností objektu. Fotografie objektu nebo videozáznamy posuzovat stejně jako v případě vizualizace.

Kvalitativně jinou metodou, která je zároveň podporou rozvoje vizualizačních a optických metod, je počítačové modelování. Toto modelování poskytuje zajímavé a názorné informace o objektech, ale tyto informace nemusejí být vždy obrazem skutečnosti, neboť zjednodušené matematické modely nemusejí věrohodně odrážet skutečnost.

Kombinací výpočetní techniky, vizualizačních a optických metod lze získat efektivní nástroj výzkumu.

Pro experimenty v hydrodynamické vaně, jsou vhodné metody, při nichž je výhodná tenká vrstva kapaliny, do níž se zavádějí vizualizační (stopovací) částice. Důležitý je barevný kontrast vizualizačních částic, proudící kapaliny a modelu.

3.1 Vizualizační metody, založené na sledování částic, které netvoří souvislá vlákna ani větší souvislé oblasti

Částice, zaváděné do proudící tekutiny, se pohybují spolu s tekutinou a jejich pohyb vytváří obraz proudění. Jako vizualizační částice se používají malé částice tuhé látky (obvykle kovový nebo balsový prach, lycopodium, drobné kousky slídy, ztuhlé kapičky polystyrenu, které se rozptylují na hladinu. Částice lze zavádět jemnými tryskami přímo do objemu kapaliny. Mohou to být drobné kapičky oleje, chloridu uhličitého s xylenem nebo s benzenem. Zvláštním případem je zavádění jemných bublinek (vzduchových, vodíkových, heliových) do kapaliny.

3.2 Vizualizační metody, založené na sledování částic, které tvoří souvislá vlákna nebo větší souvislé oblasti

Do tekutiny, proudící kolem modelu, jsou jemnými tryskami zaváděny částice, které vytvářejí barevná vlákna. Používají se různá barviva (například Indigo, malachitová zeleň, anilínové barvy s příměsí alkoholu, tuš, razítková barva, neslazené kondenzované mléko, vodný roztok hypermanganu, obarvený petrolej), jejichž hustota se upravuje ředěním vodou a lihem. Pro lepší efekty lze použít několika různobarevných kapalin. Vytvoření vláken lze dosáhnout také elektrolýzou nebo chemickými reakcemi, rovněž lze využít i nitěných sond.

3.3 Vizualizační metody, založené na sledování změn povrchu obtékaných těles

Metody, při nichž je upravován povrch obtékaných těles, lze rozdělit do tří skupin: chemické, fyzikální a mechanické – [14], [15]. Pro hydrodynamickou vanu nejsou vhodné chemické metody, protože proudící kapalinou bývá většinou voda, jejíž vlastnosti značně omezují výběr vyhovující vizualizační látky, která by s vodou reagovala. Fyzikální metody jsou v hydrodynamické vaně použitelné, principem je postupné rozpouštění látek kontrastních barev, které byly nanесeny na povrch obtékaného tělesa. V místech intenzivnějšího obtékání se indikační nátěr rozpouští rychleji, podle barvy lze identifikovat druh proudění, přechodové oblasti, úplavy a stěnová tečná napětí. Nátěry o tloušťce 5 až 12 μm lze provést například acetoacetanilidem, exalginem (methyacetoanilidem), acetanilidem, fenacetinem, hydrochinon diacetátem, benzoinem apod. Barva modelu a nátěru musí být kontrastní, nátěr musí být dokonale hladký a nesmí tvořit nerovnosti povrchu. Fyzikální metody se v hydrodynamické vaně k experimentům nepoužívají, protože náročnost přípravy modelu z hlediska kvality nátěrů není adekvátní získaným výsledkům. Mechanické metody představují jednoduché a na uspořádání nenáročné úpravy povrchu. Model, natřený silnou vrstvou olejové barvy je před zaschnutím vložen do proudu kapaliny. Po určité době se v nátěru vytvoří jemné rýhy, určující směr proudění na povrchu tělesa. Jiný způsob mechanických metod představuje pokrytí modelu kapkami olejové barvy, které jsou po určité době rozmazány ve směru proudění. Olejová barva musí mít takovou konzistenci, aby k rozmazání nedošlo okamžitě po vložení modelu, ale až po nějaké době. Tyto metody se v hydrodynamické vaně používají jen v rámci popularizace oboru.

Zcela odlišnou mechanickou metodou je použití nitěných sond, připevněných na povrchu modelu. Nítě by neměly být příliš nasákavé, aby vlastní vahou neovlivňovaly výsledek experimentu, pro některé experimenty se vzduchem lze napouštět škrobem. Délka nití je volena podle velikosti modelu a sledovaného jevu. Podle orientace nití lze určovat nejen směry místních rychlostí na povrchu tělesa, ale i frekvenci opakujících se jevů. Nevýhodou všech mechanických metod je možné zkreslení průběhu proudění vlivem nerovností „kapek“, upevnění nití apod.

4 Numerické simulace

Tato kapitola je věnována numerickým výpočtům proudění pro účely porovnání numeriky s experimenty, realizovanými v hydrodynamické vaně.

4.1 Použitý software

Pro výpočty, jejich přípravu a vyhodnocení byly použity moduly komerčního softwaru společnosti Ansys. Pro starší výpočty byl použit preprocesor Gambit 2.3 a Ansys-Fluent 6.3. Vzhledem k akvizici výpočetní platformy společností Ansys, byly pro novější výpočty využity aktuální moduly prostředí Ansys verzí 14, 15 a 16. Příprava geometrie byla provedena v programu Ansys DesignModeler. Síťování geometrie a zadání oblastí okrajových podmínek bylo provedeno v modulu Ansys Meshing. Vlastní nastavení výpočetních modelů, diskretizačních schémat, sledovaných veličin během výpočtů a výpočet byl proveden v prostředí programu Ansys-Fluent. Vyhodnocení výsledných dat bylo provedeno v programu CFD-post.

4.2 Použité řešiče, modely a diskretizační schémata.

Sledované procesy byly nestacionární a pro jejich zachycení bylo nutné provést nestacionární výpočty. Tento přístup je velice časově náročný a proto byly přistoupeno k výpočtu ve 2D. Trojrozměrné simulace by znamenaly významné navýšení potřebné výpočetní kapacity a celkově složitější úlohu (multifáze a nároky na detaily sítě). Pro všechny výpočty byl použit řešič „Pressure-based“, který je vhodný pro nestlačitelné podzvukové proudění. S ohledem na charakter proudění, rozlišení sítě a časový krok byly použity turbulentní modely k-omega, k-omega SST a laminární. Časový krok nestacionárního výpočtu byl volen tak, aby splňoval podmínku konvergence. Proudící tekutinou v numerických simulacích byla voda. Vzhledem k parametrům proudění byla voda uvažována jako nestlačitelná, s materiálovými vlastnostmi, převzatými z databáze programu Fluent (hustota $998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, dynamická viskozita $1,003 \text{ mPa}\cdot\text{s}^{-1}$).

4.3 Okrajové podmínky

Ve výpočtech byly použity tři typy okrajových podmínek. Na vstupu byla definována okrajová podmínka „velocity inlet“, která v použité podobě definuje konstantní vstupní rychlostní profil a zajišťuje průtok odpovídající střední rychlosti proudu v experimentu. Pro všechny výpočty byla připravena dostatečná náběhová část, která stejně jako v experimentu umožnila vývin rychlostního profilu. Další použitou podmínkou je „wall“ – stěna. Podmínka definuje nulovou rychlost proudu na styčné ploše (hraně pro 2D). Poslední podmínkou je „pressure-outlet“, která v použitém tvaru umožňuje definici konstantního přetlaku na ploše (hraně 2D) a umožňuje odtok tekutiny hranicí. Tato podmínka také disponuje možností vstupu tekutiny do výpočetní domény, pokud dojde k podtlaku na sousedních buňkách hranice.

5 Experimentální zařízení pro vizualizaci dvojrozměrného proudění kapalin

5.1 Komerční analogová zařízení

Při průtoku tekutiny úzkou mezerou, tvořenou dvěma rovnoběžnými deskami (Hele-Shaw 1897) má průtok skutečné tekutiny charakter potenciálního proudění. Teoretický důkaz toho, že při dostatečně nízké rychlosti proudění (vliv třecích sil převládá nad vlivem sil setrvačných), se reálné tekutiny řídí stejnými zákony jako kapaliny ideální, provedl Stokes. Model plochého tvaru se upevní mezi dvě rovnoběžné desky, z nichž alespoň jedna musí být skleněná (kvůli pozorování). Vzdálenost desek se volí v závislosti na rozměrech modelu a pozorovacího prostoru a měla by být tak malá, aby ji bylo možno z hlediska proudění zanedbat. Zviditelnění se provede pomocí barviva, zaváděného tryskami do kapaliny. Tvar pramének barvy odpovídá tvaru proudnic absolutního pohybu kapaliny.

Příkladem experimentálního zařízení, pracujícího na tomto principu, je na „Laminární stůl“, vyráběný firmou Armfield – obrázek č.9 a „Hydrodynamický stůl“ od firmy G.U.N.T. – obrázek č.10. V obou případech se jedná o učební pomůcky menších rozměrů 892x610 mm (Armfield) a 910x591 mm (G.U.N.T.). Firma G.U.N.T. nabízí i menší variantu stolu – „Vizualizační aparaturu“ o rozměrech 900x640x480 mm – obrázek č.12 a alternativní řešení se svisle orientovanou 20 mm širokou mezerou – „Vodní kanál“ o rozměrech 625x20x150 mm – obrázek č.11. K uvedeným zařízením jsou dodávány i demonstrační modely.

Proudění reálných kapalin se nejlépe pozoruje v hydrodynamických kanálech. Pro dvojrozměrné proudění jsou nejčastěji používány otevřené kanály s rovinným dnem, v nichž jsou pevně ukotvené modely obtékány slabou vrstvou kapaliny. Zařízení tohoto typu nejsou na trhu dostupná, konstruují se na zakázku pro podmínky konkrétní laboratoře.



Obr. 9 Laminární stůl (Armfield) – [42]

Celkové rozměry zařízení 892x610mm, rozměry pracovního prostoru ani maximální průtočné množství nejsou ve firemních materiálech uvedeny.



Obr. 10 Hydrodynamický stůl (GUNT) – [43]

Celkové rozměry zařízení 910x591 mm, rozměry pracovního prostoru 890x400 mm, mezera mezi skly 5 mm, maximální průtok vody 300 l.h⁻¹.



Obr. 11 Hydrodynamický kanál (GUNT) – [43]

Celkové rozměry zařízení nejsou ve firmních materiálech uvedeny, rozměry pracovního prostoru: 625x150 mm, mezera mezi skly 20 mm. Maximální průtok vody není uveden.



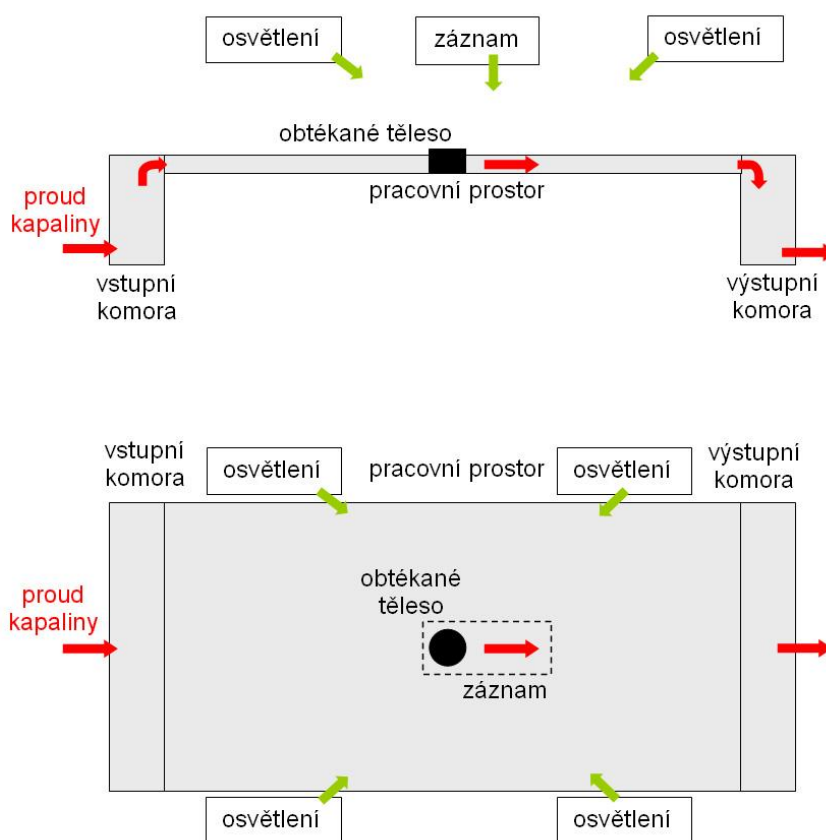
Obr. 12 Vizualizační aparatura (GUNT) – [43]

Celkové rozměry zařízení 640x150 mm. Rozměry pracovního prostoru ani maximální průtočné množství nejsou ve firmních materiálech uvedeny.

5.2 Hydrodynamická vana

Experimentální zařízení pro hydrodynamickou analogii a zviditelnění proudění – „hydrodynamická vana“ – bylo navrženo na Katedře tepelných a hydraulických zařízení na Vysoké škole strojní textilní v Liberci, nyní Katedře energetických zařízení, a poté vyrobeno ve vlastních vývojových dílnách. V porovnání s učebními pomůckami, popisovanými v předcházející kapitole 5.1, byly zvoleny poněkud větší rozměry, aby bylo možné i jiné než „školní“ využití.

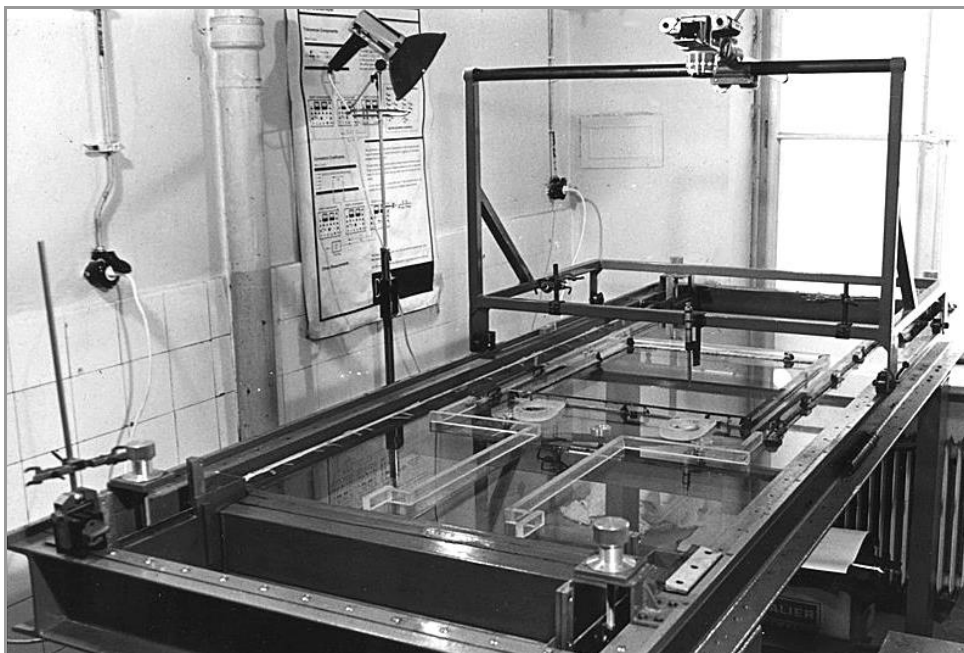
Zviditelňování proudění je založeno na průtoku tenké vrstvy vody v kanále s rovinným dnem. Na hladinu (nebo do objemu kapaliny), se zavádějí vizualizační částice, praménky barvy anebo se upevňují nitěné sondy. Pohyb částic, pramének nebo nití je předmětem pozorování a následného analyzování chování proudící kapaliny. Průběh experimentu lze sledovat přímo na zařízení nebo na videozáznamech. Schéma zařízení „hydrodynamická vana“ je na obrázku č.13.



Obr. 13 Schéma hydrodynamické vany

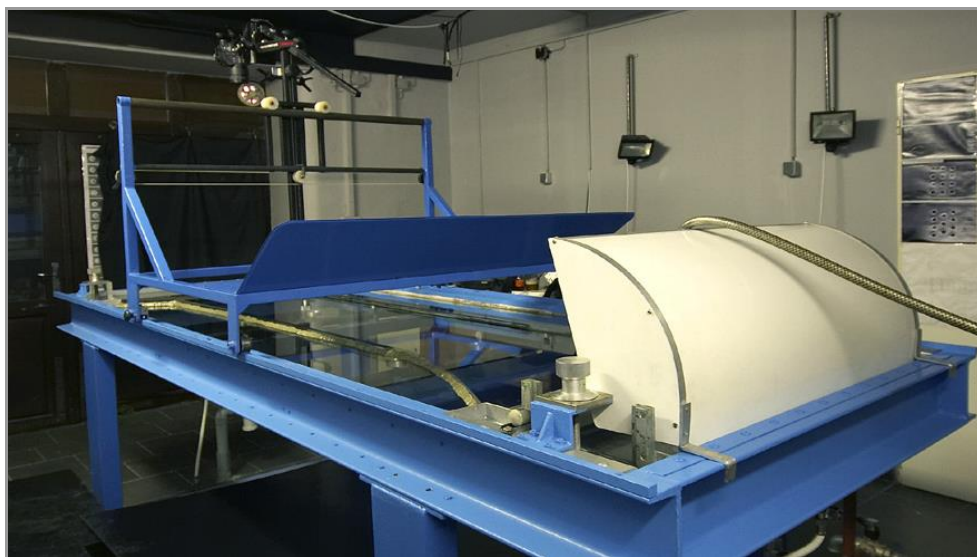
První verze hydrodynamické vany na obrázku č. 14, vyrobená v roce 1970, byla v roce 2002 upravena. Rám modelové vany byl snížen přibližně o 30 cm, neboť původní záměr fotografování experimentů zdola se neosvědčil a vysoká konstrukce komplikovala pozorování experimentu shora.

Největší změny prodělala záznamová technika. Fotoaparát Pentacon Super s objektivem Flectogon 2,8/35 byl v roce 2003 nahrazen digitální zrcadlovkou Olympus Camedia E-20P, nově byla pořízena videokamera Sony DCE-TRV240E a monitor. V roce 2008 byla záznamová technika doplněna výkonnějším fotoaparátem Canon EOS 40D s časováním. Novější verzí fotoaparátu Canon EOS 50D, zakoupená v roce 2011 poskytuje širší možnosti v předvolbách fotografování.



Obr. 14 Hydrodynamická vana – původní stav v r. 1970

Na obrázku č.15 je hydrodynamická vana tak, jak vypadala v roce 2007. Další růběžně prováděné úpravy se týkají zásobníku barviva, modernizace osvětlení, záznamové a měřicí techniky.



Obr. 15 Hydrodynamická vana po úpravách v r. 2007

Celkové rozměry zařízení 3100x1300x1200 mm, rozměry pracovního prostoru: 2200x1000 mm, maximální průtok vody 860 l.h⁻¹.

S větším sortimentem záznamové techniky souvisejí úpravy zařízení i prostoru laboratoře. Nová konstrukce držáku záznamového zařízení umožňuje pohodlnější a přesnější nastavení a aretaci polohy fotoaparátů a kamery, zrcátko usnadňuje kontrolu záznamu. Částečné zakrytí vany omezuje možnosti znečištění drahé videotechniky. Černě natřený strop, černé podložení stolu, černé závěsy, difuzní fólie, zastínění záznamového zařízení, výroba unikátní samospouště, to jsou úpravy, sledující odstranění/ omezení nežádoucích odlesků a stínů.

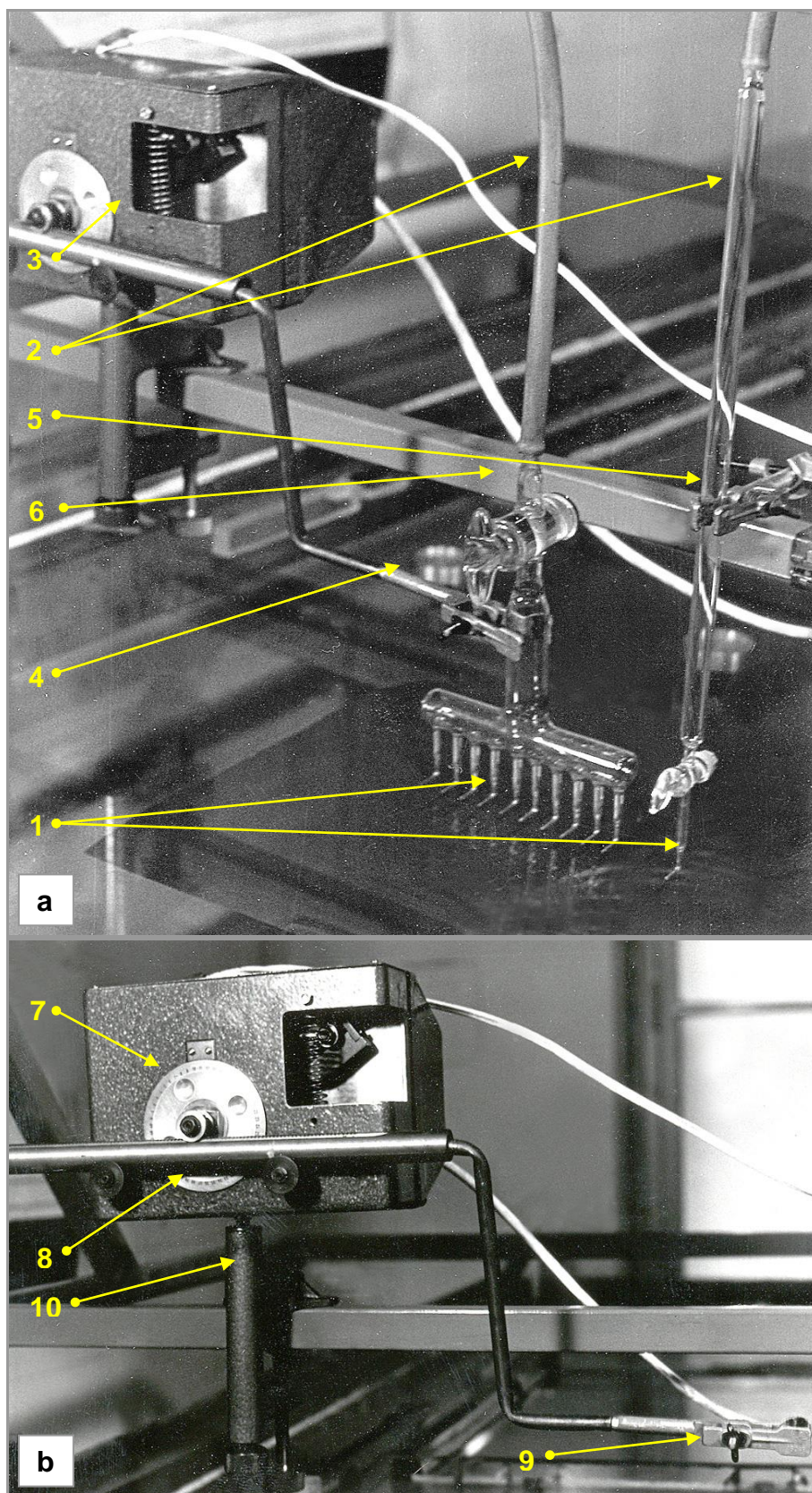
Zcela novým příslušenstvím hydrodynamické vany je traverzovací zařízení, popsané v kapitole 5.2.6. Jená se o systém pojezdů a plošin pro snadné upevnění a manipulaci s měřidly a záznamovými médii a pro možnost opakovatelných bodových měření.

Nejdůležitějším počinem z hlediska vývoje měřicí techniky je snímač výšky hladiny vody a frekvence kmitání hladiny, sloužící k lokálnímu měření výšky hladiny a ke stanovení frekvence kmitání hladiny. Unikátnímu měřicímu zařízení, které bylo vyvinuto a vyrobeno v rámci řešení disertační práce je věnována kapitola 5.2.5.

5.2.1 Měření průtočného množství

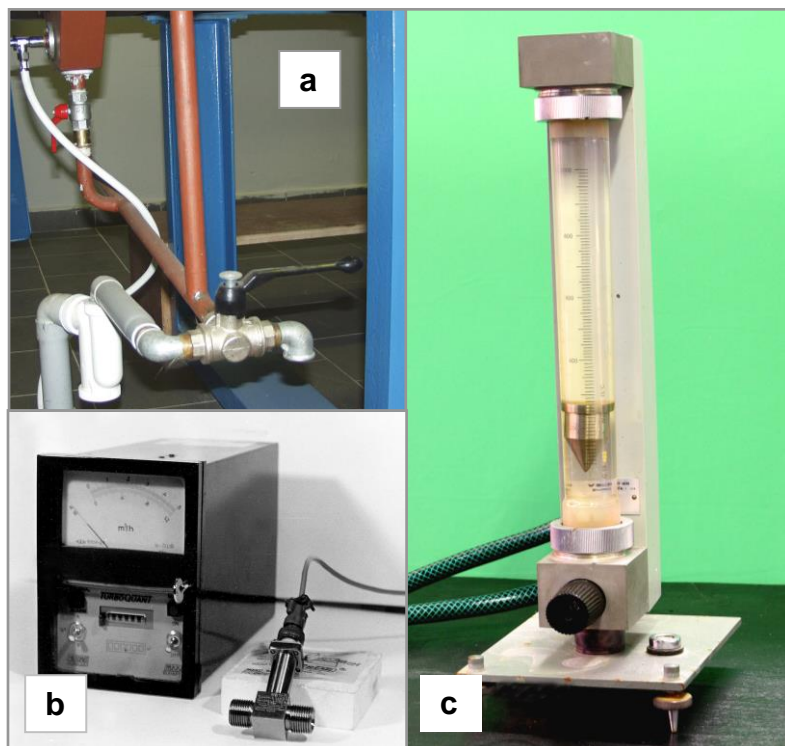
Systém je koncipován jako otevřený, a to z důvodu čistoty a jednoduchosti. Proudící kapalinou je voda z vodovodní sítě. Na přívodním potrubí, tj. před vstupní komorou analogového zařízení, je vložen rotametr (obrázek č.17c), který nahradil dříve užívaný průtokoměr (obrázek č.17b). Rotametr je kalibrován, přesnost měření se kontroluje při každé výměně trubic rotametru. Maximální hodnota objemového průtoku je vzhledem k možnostem sítě 820 litrů za hodinu, ale tato maximální hodnota není pro experimenty vhodná a obvykle se nepoužívá (doporučené hodnoty jsou uvedeny v kapitole 5.3.5. Je totiž riskantní používat limitní anebo jim velmi blízké hodnoty, protože mohou být snadno překročeny, experiment se pokazí a výsledky jsou nepoužitelné. Z tohoto důvodu se experimenty realizují při nižších objemových průtocích – obvykle se pohybují kolem $\dot{V} = 400 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Během experimentu se průtok kontroluje a podle potřeby reguluje škrcením pouze na rotametru. Pro měření průtočného množství kapaliny by bylo možno použít také objemovou měřicí metodu, kdy by byla na výstupní části (obrázek č.17a) po určitou dobu jímána voda do odměrné nádoby. Tato metoda se však kvůli nutné časté manipulaci s odměrnou nádobou hodí jen ke kalibraci.

Výskyt nežádoucích efektů je hlídán přímým pozorováním experimentu a regulací přítoku vody. K hrubé regulaci slouží kohout na přívodu z vodovodní sítě, jemnější regulace se provádí rotametrem. Tento způsob je jednoduchý, ale je třeba neustálé kontroly stability přítoku. Změní-li se průtok, jsou ovlivněny všechny veličiny s ním související a zároveň vznikne problém s intenzitou vizualizačních ingrediencí. Zpoždění, s nímž reaguje analogové zařízení na pokles průtoku, je nedefinovatelné, takže se na ně nelze předem nijak připravit a při zjištění nesrovnalostí se musí experiment opakovat. Tento problém by vyřešila vyrovnávací nádrž, jejíž konstrukce bude dalším krokem při vylepšování hydrodynamické vany



Obr. 16 Dávkovací zařízení pro zavádění barvy do kapaliny a krokovací zařízení

a) zavádění barvy, b) krokovací zařízení, 1 speciálně upravené byrety pro zavádění barvy do vody, 2 přívod barvy, 3 krokovací zařízení, 4 držák byrety je připojen ke krokování, 5 držák byrety, připevněný k pojezdu, 6 podélný pojezd, 7 pohon krokovacího zařízení, 8 tyč s ozubeným hřebenem, 9 držák sondy, 10 kulový kloub.



Obr. 17 Měření průtočného množství

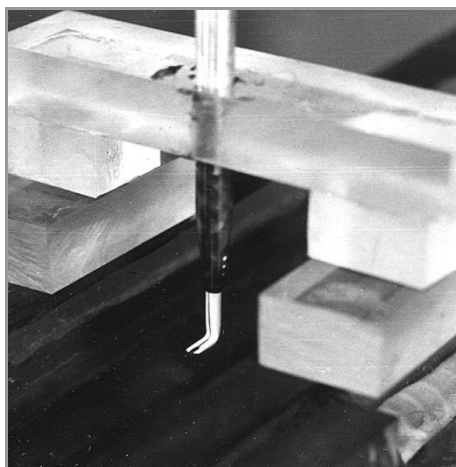
výstup pro měření objemovou metodou, b) průtokoměr Turboquant, c) rotametr.

5.2.2 Měření rychlosti proudění

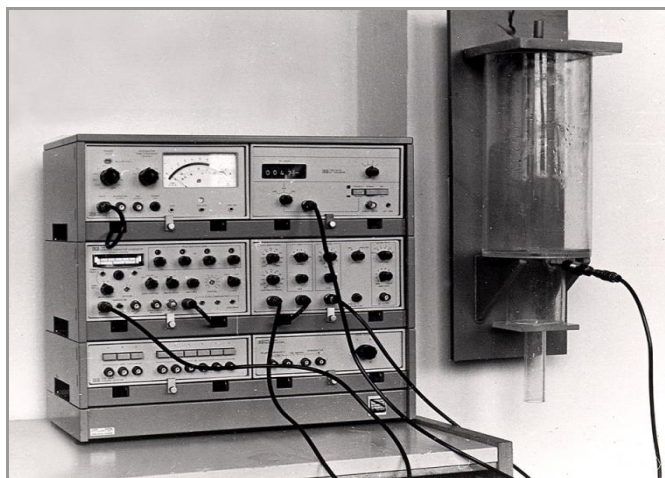
Při experimentování jsou kladeny nároky na přesné určení rychlosti proudění. Obvykle postačují střední rychlosti, ale existují případy, kdy je třeba pracovat s rychlostí proudění na hladině, případně v určité hloubce pod ní. Určení optimálních minimálních a maximálních rychlostí ovlivňuje výsledek experimentu. Při rychlostech mimo rozmezí nemusí být očekávané jevy pozorovatelné, případně měřitelné. V případě překročení maximální rychlosti mohou navíc vznikat nežádoucí jevy, kvůli nimž nelze v experimentu pokračovat. Nejčastěji dojde k zatopení modelů, změně směru proudění, zvlnění hladiny vlivem povrchových vln, posunutí částí modelů, případně předčasné difuzi praménků vizualizačního roztoku. Limitní hodnoty rychlosti nejsou konstanty, záleží na konkrétním experimentu, na jeho typu, geometrii, hodnotě průtočného množství a použité vizualizační metodě.

Pro experimenty je třeba znát hodnotu rychlosti v konkrétním místě. Kromě případu proudění ideální kapaliny není hodnota rychlosti konstantní ani v jedné z rovin xy, yz, zx (souřadný systém zaveden v kapitole 2.1.1). V rovině hladiny xy se rychlost u stěn kanálu blíží k nule, zatímco maximální rychlosti w_{\max} je dosaženo v ose kanálu – viz obrázek č.20. Pro laminární proudění $w_{\max} = 2 \cdot w_{\text{stř}}$, pro turbulentní proudění $w_{\max} = 1,24 w_{\text{stř}}$. V rovině zy , kolmé k hladině a rovnoběžné se směrem proudění, je maximální rychlost w_{\max} proudu v jedné třetině hloubky vody (měřeno od hladiny), za předpokladu nenulové rychlosti w_0 proudu u dna kanálu by byla střední rychlost $w_{\text{stř}} = 0,66 \cdot w_h + 0,33 \cdot w_0$ v hloubce $h_s = (0,56 \div 0,67) \cdot h$ (měřeno od hladiny), w_h je rychlost na hladině – [7].

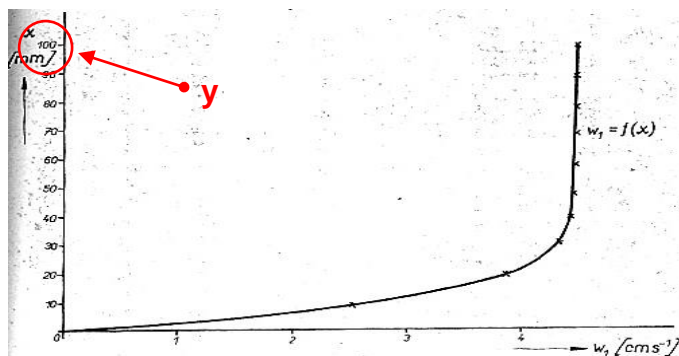
Měření byla dle literatury [7] provedena filmovou termo-anemometrickou sondou – obrázky č.18 a 19, grafické výstupy na obrázcích č.20 a 21 zřejmě dokumentují reálné rychlostní profily.



Obr. 18 Filmová žhavená sonda DISA

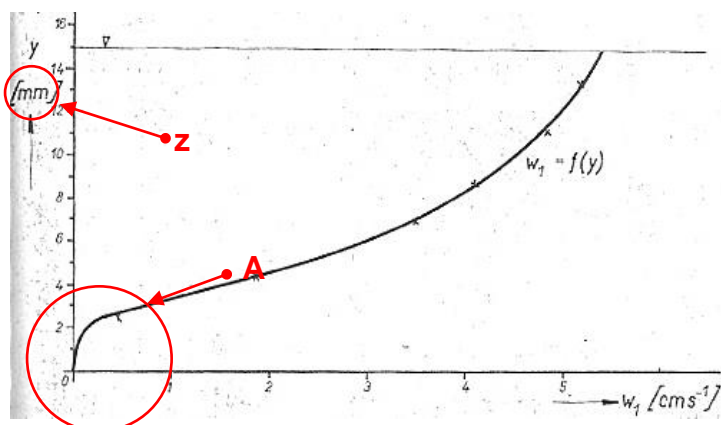


Obr. 19 Cechovací zařízení s anemometrem DISA



Obr. 20 Rychlostní profil ve vstupním kanále měřený v 1/3 výšky pod hladinou (v rovině xy, rovnoběžné s rovinou hladiny) – [7]

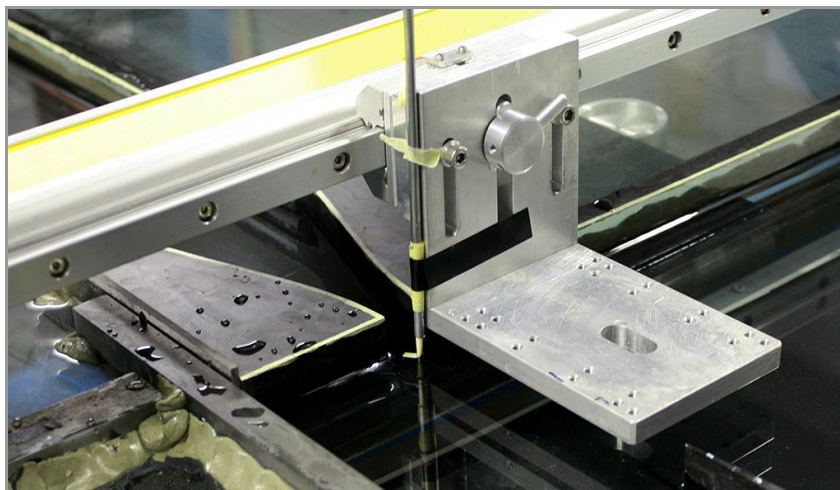
Obrázek byl převzat z literatury, v níž byl souřadný systém zaveden jinak – směr „x“ na obrázku odpovídá směru „y“ v disertační práci.



Obr. 21 Průběh rychlosti pod hladinou (ve svislé rovině zy) – [7]

Obrázek byl převzat z literatury, v níž byl souřadný systém zaveden jinak – směr „y“ na obrázku odpovídá směru „z“ v disertační práci. A je zakřivení části křivky v oblasti, kde již nebyla provedena měření, bylo autory dokresleno v souladu s předpoklady, že u dna se voda nepohybuje.

Kontrolní měření rychlosti byla provedena v kanále konstantní šířky, zakončeném tryskou. Délka kanálu byla 1 m a šířka 86 mm, šířka trysky byla 20 mm. Rychlost byla měřena v ose přítokového kanálu, uprostřed jeho délky a v ose trysky. Měřicí sonda byla ponořena do jedné třetiny výšky hladiny (měřeno od hladiny). Byla použita metoda CTA (Constant temperature anemometry). Kalibrace byla provedena pomocí polynomické křivky 3. řádu: $w = A + BU + CU^2 + DU^3$, kde $w(m \cdot s^{-1})$ je rychlost proudění, $U(V)$ je napětí na drátku sondy, $A, B, C, D(1)$ jsou kalibrační konstanty. Při měření pro kalibraci byla nastavena konkrétní rychlost $w(m \cdot s^{-1})$ a změřena hodnota napětí $U(V)$.



Obr. 22 Sonda CTA při kontrolním měření

Sonda byla připevněna k plošině příčného pojezdu traverzovacího zařízení a je v poloze pro měření v ústí trysky.

Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami, vypočtenými z rovnice kontinuity, do níž byly dosazeny výšky hladin, změřené hladinoměrem při daných průtočných množstvích. Při porovnání hodnot středních rychlostí, zjištěných měřeními a výpočtem, byly zjištěny minimální odchylky – graf č.4.

Při měření rychlostí v kanálech malých rozměrů je měření rychlosti problematické, protože ponořená měřicí sonda je vzhledem k velikosti modelů příliš velká a může ovlivnit proudění. V těchto případech je tedy lépe spokojit se se zjištěním středních rychlostí proudění výpočtem z rovnice kontinuity.

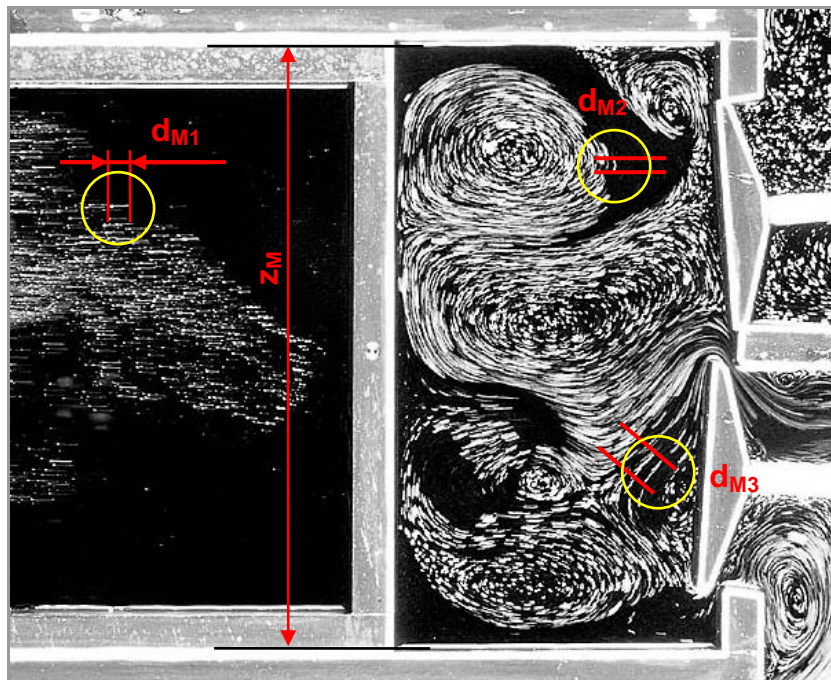
Rychlost proudění na hladině by bylo možné určit výpočtem z délek trajektorií vizualizačních částic a z expoziční doby snímku¹⁹. Do vztahu pro výpočet rychlosti w se dosadí délka trajektorie a expoziční čas snímku:

$$w = \frac{l_D}{t}, \quad (5.1)$$

kde $l_D = \frac{z_D \cdot l_M}{z_M} (mm)$ je přepočtená délka trajektorie, $z_D (mm)$ je rozměr díla – reálného modelu, $z_M (mm)$ je rozměr modelu na fotografii, $d_M (mm)$ je délka trajektorie na fotografii, $t(s)$ je expoziční čas.

¹⁹Snímky se pořizují při delší expoziční době (obvykle 1-2 s), pohyb, vykonaný jednotlivými vizualizačními částicemi, se na nich zobrazí jako různě dlouhé čárky

Ukázka vyhodnocování lokálních rychlostí je na obrázku Obr. 23, kde délkám trajektorií na fotografii $d_{M1} = 3 \text{ mm}$, $d_{M2} = 1,5 \text{ mm}$ a $d_{M3} = 4,5 \text{ mm}$ (po dosazení rozměrů skutečného modelu $z_D = 210 \text{ mm}$ a rozměru modelu na fotografii $z_M = 81 \text{ mm}$ do rovnice (5.1) odpovídají rychlosti $w_{D1} = 7,7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $w_{D2} = 3,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $w_{D3} = 11,6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 23 Vyhodnocení lokálních rychlostí z délek trajektorií vizualizačních částic

d_{M1}, d_{M2}, d_{M3} jsou délky trajektorií na modelu (fotografii), z_M je rozměr modelu.

Určování rychlostí z trajektorií je zdoluhavý proces, navíc velmi nepřesný, takže pro experimenty se nehodí. Nelze ho však nezmínit, protože právě na tom je založeno vyhodnocování obrazu proudění, získaného při vizualizaci.

V případě experimentálního zařízení pro dvourozměrné proudění se vychází z předpokladu, že výška vodní vrstvy je tak malá, že lze rozdíl rychlostí ve svislém směru zanedbat, a tak se počítá se střední rychlostí, změřenou nebo vypočtenou.

5.2.3 Měření výšky hladiny

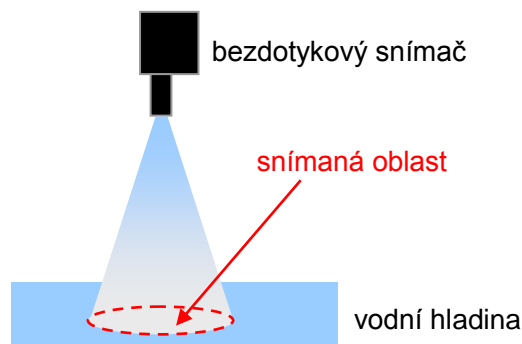
Důvodem měření výšky hladiny v hydrodynamické vaně jsou závěry, plynoucí z hydrodynamické analogie v kapitole 2.1.3. Měření výšky hladiny je velmi častým technickým úkonem, proto existuje široká škála snímačů hladiny, vzájemně se lišících systémem měření a konstrukcí – [59].

Z hlediska systému měření existují dva typy snímačů hladiny: snímače, které měří kontinuálně²⁰ a snímače, které naměří okamžitou hodnotu. Z hlediska konstrukčního provedení se snímače člení na skupinu vodoznaků, plováků a hydrostatických ponorných sond a na skupinu ultrazvukových, radarových, kapacitních a vodivostních snímačů.

Snímač hladiny vody v hydrodynamické vaně musí splňovat dva základní požadavky: musí měřit velmi přesně výšku hladiny v konkrétních bodech a nesmí narušovat proudění na

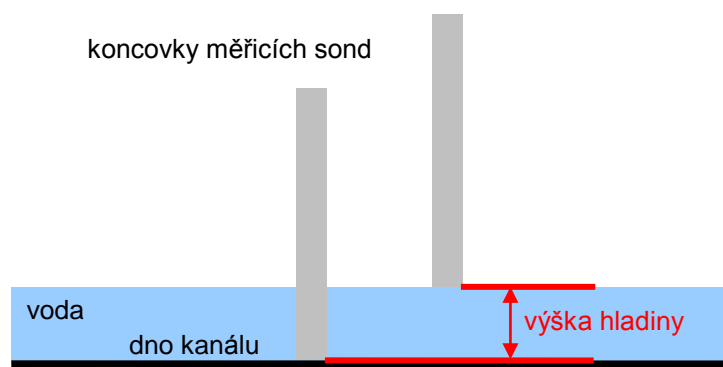
²⁰ Alarmy se automaticky spouštějí při splnění předem definované podmínky – v tomto případě výšky hladiny, snímače kontinuální jsou technicky složitější a monitorují celý systém.

modelu. Těmto požadavkům nevyhovují vodoznaky, neboť neměří lokálně, ani plováky či ponorná čidla, protože ponořením do proudu ovlivňují průtok. Překvapivě nevyhovuje ani skupina ultrazvukových a radarových hladinoměrů. Tyto bezdotykové snímače neruší proudění, umí měřit lokálně, ale nejsou schopny měřit bodově. Při měření zabírají kuželem na hladině vytyčenou kruhovou oblast a výsledek je průměrem hodnot dané oblasti (obrázek č.24Obr. 24).



Obr. 24 Schematické znázornění nevhodnosti měření lokální hodnoty rychlosti bezdotykovým snímačem hladiny

Požadavkům, kladeným na vlastnosti měřidla výšky hladiny pro hydrodynamickou vanu, by nejlépe vyhověly kapacitní či vodivostní snímače²¹, ale komerčně dostupné produkty jsou konstruovány pro příliš velké rozměry.

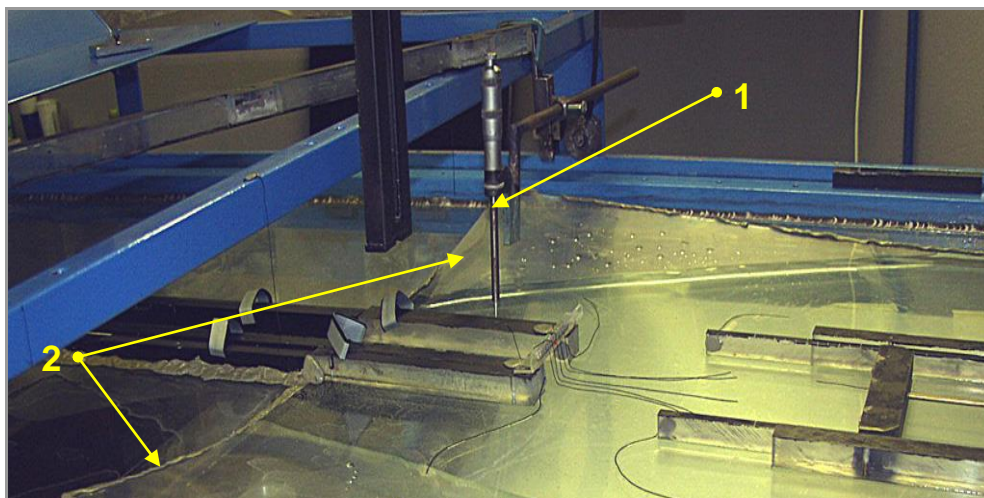


Obr. 25 Schematické znázornění měření výšky hladiny vody

Pro měření výšky hladiny byl zpočátku používán mikrometrický šroub na obrázku č.27, který byl pomocí přípravku upevněn na rám pojezdu. Výška hladiny byla vyhodnocována jako rozdíl hodnoty, kdy se hrot mikrometru dotkl hladiny a hodnoty, kdy se hrot dotkl dna kanálu – obrázek č.25. Obrázek č.26 je věnován měření výšky hladiny vody ve vstupním kanále sestavy v experimentu plnění symetrické dutiny z kapitoly 6.3. Kromě měřidla (mi-

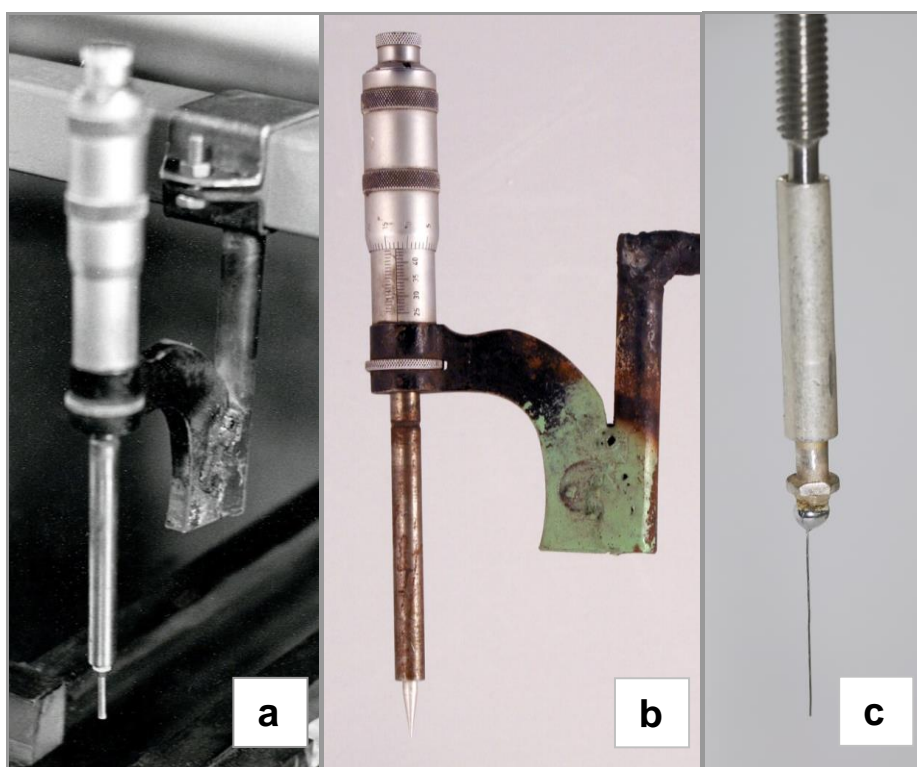
²¹ Kapacitní snímače mají různá uspořádání, obvykle se jedná o válcový kondenzátor, jehož kapacita je přímo úměrná výšce kapaliny a jejíž permitivita je rozdílná od permitivity vzduchu. Jejich sonda monitoruje změny hladiny v nádrži, elektronicky se výstup sondy mění kapacitně i odporově a tyto změny se převedou na analogové signály. Sondy a stěny nádrže lze přirovnat ke dvěma deskám kondenzátoru, roztok pak k dielektriku. Ulpívající materiál na sondě nemá vliv na měření, protože samotný signál vychází ze změn hladiny. Nevýhodou takovýchto uspořádání je závislost kapacity snímače nejen na výšce hladiny kapaliny, ale i na změně její permitivity, která je závislá na jejím druhu, teplotě a hustotě. Pro hydrodynamickou vanu to nevadí, neboť zde protéká jediný druh kapaliny – voda.

krometrického šroubu) je vidět důsledek nehody – nežádoucí prohnutí plexisklové desky²². Došlo k tomu následkem nechtěného vniknutí vody mezi plexisklovou desku a skleněné dno kanálu. Přes noc vnikla voda do miniaturních, okem nepostřehnutelných pórů a deska se prohнула. Experiment musel být odložen do úplného vyschnutí desky.



Obr. 26 Měření výšky hladiny mikrometrickým šroubem.

1 koncovka mikrometrického šroubu, 2 následky „nehody“, při níž se prohнула plexisklová deska, na níž byl přišroubován model.



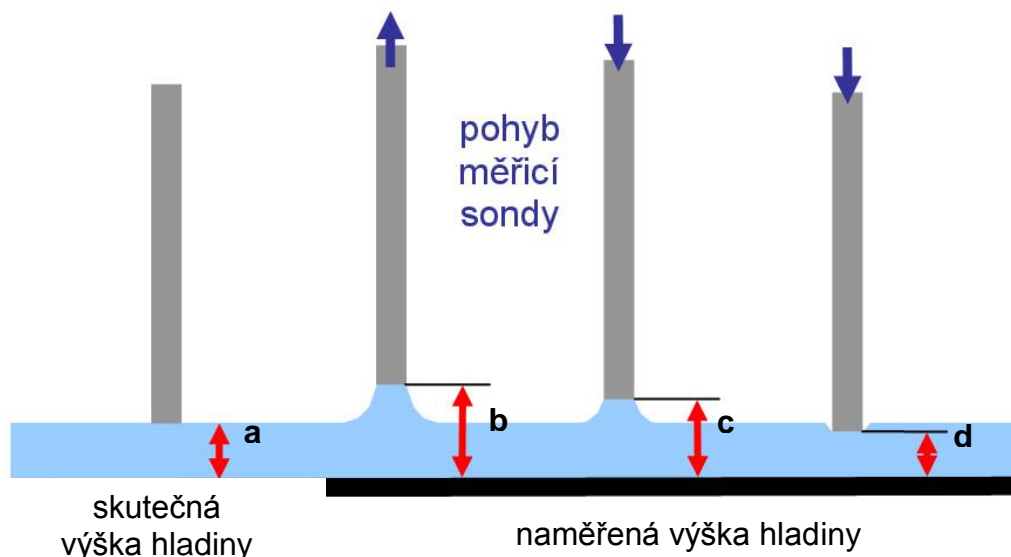
Obr. 27 Mikrometrický šroub a vlasová redukce snímače

a) válcové zakončení mikrometrického šroubu, b) kuželové zakončení mikrometrického šroubu, c) vlasová redukce nově konstruovaného snímače – viz též kapitola. 5.2.5.

²² Je-li požadována velká přesnost uspořádání modelové sestavy (například souosost), jednotlivé díly sestavy se lepší nebo šroubují na plexisklovou desku. Ta se potom vloží do pracovního prostoru na skleněné dno kanálu a připevní se tmelem.

Dotyk hrotu s hladinou byl sledován vizuálně, což činilo potíže i při klidné hladině. Díky vzlínavosti vody bylo velmi obtížné odhadnout pouhým okem okamžik kontaktu a vznikaly chyby. Vlivem povrchového napětí vody se mezi koncovkou pohybující se měřicí sondy a vodní hladinou vytvářel vodní „kužílek“. Byly provedeny zkoušky, při nichž byly jednotlivé fáze svislého pohybu sond sekvenčně fotografovány. Při vyhodnocování snímků se ukázalo, že při pohybu sondy směrem vzhůru se hladina od sondy oddělí ve větší vzdálenosti než je vzdálenost, při níž vodní hladina přilne k přibližující se sondě. Zároveň bylo zjištěno, že už při mírném zamaštění sondy (od prstů obsluhy) se někdy stane, že přibližující se sonda udělá v hladině důlek. Z provedených zkoušek vyplynul závěr, že pro experiment je výhodnější sondu při měření z vody zvedat, a to i přesto, že se sonda musí „vzdálit“ více, než když se přibližuje, ale tato vzdálenost je stále stejná – viz obrázek č. 28).

Průběh zkoušek je na obrázku č.30, kde série fotografií zachycuje proces přibližování hrotu mikrometru ke klidné hladině, přilnutí vodní hladiny k hrotu a následné oddělení hladiny od hrotu a vznik kapky na hrotu. Na zvětšeninách je vidět evidentní rozdíl ve vzdálenostech hrotu mikrometru a hladiny bezprostředně před kontaktem v případě přibližování a bezprostředně po kontaktu v případě oddalování hrotu – obrázky č.30b, 30e a obrázky č.32 b, 32e. Vlasová redukce na obrázku č.32 byla zkoušena kvůli srovnání vzlínavosti na různých průměrech sond, ale pro měření výšky hladiny se nehodí, protože je příliš choulostivá.

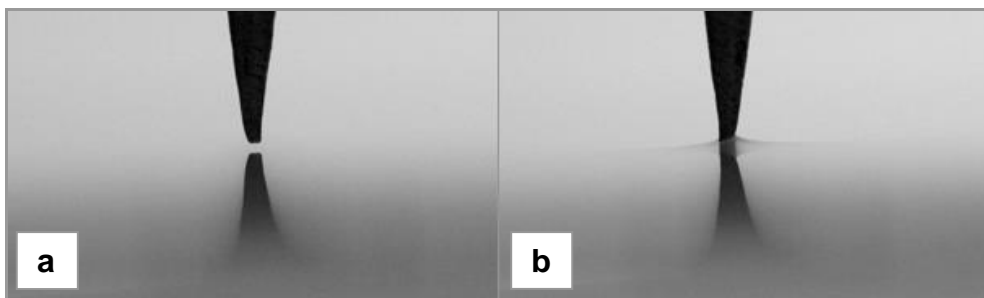


Obr. 28 Schematické znázornění chyb měření při svislém pohybu měřicí sondy

a je skutečná výška hladiny, b je výška hladiny, naměřená při pohybu sondy směrem od hladiny, c je přilnutí vodní hladiny k přibližující se sondě, d je zaboření sondy do hladiny.

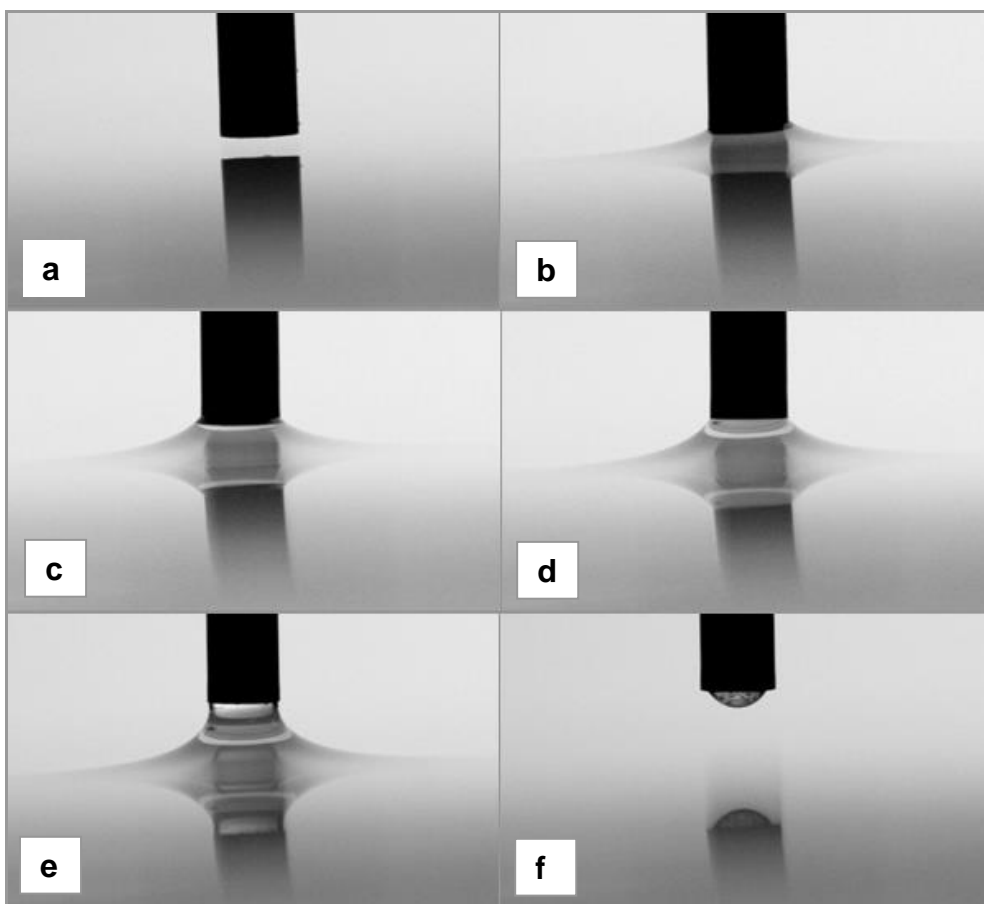
Čím menší vzdálenost je mezi hrotem a hladinou, tím přesněji lze stanovit okamžik kontaktu. Proto by bylo lepší provádět všechna měření pouze při pohybu hrotu směrem k hladině, navíc by nehrozilo ovlivnění měření vznikem kapek. Lepších výsledků bylo dosaženo s hrotem, upraveným do tvaru kužele – na obrázku č.27b. Hrot bylo možno přiblížit mnohem blíž k hladině, a také občas vznikající kapky byly podstatně menší než u válcové sondy – na obrázku č.30f.

Vliv vzlínavosti byl testován i na nově vyvíjeném měřidle, podrobně popsáném v kapitole 5.2.5, konkrétně na měřicí elektrodě hladinoměru (obrázek č.31) a na vlasové redukci snímače frekvence kmitání hladiny (obrázek č.32). Experimenty se vzlínavostí byly provedeny pro dvě kapaliny, a to pro čistou vodu a pro vodu s barvivem a hliníkovou disperzí, ale výsledky se podstatným způsobem nelišily.



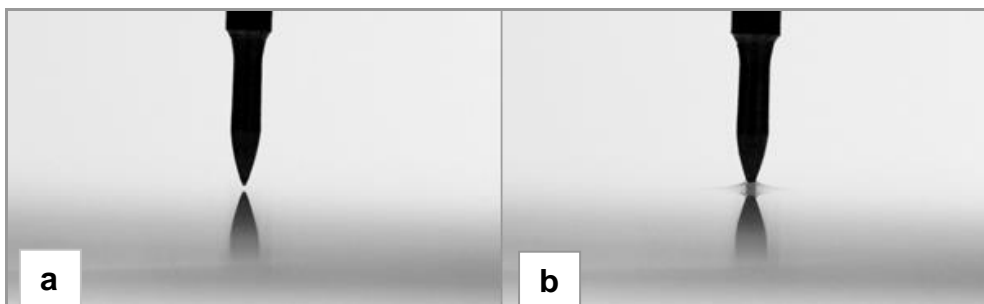
Obr. 29 Koncovka mikrometrického šroubu – detail kuželovitého zakončení o průměru 0,05 mm – takto ostré zakončení je choulostivé na poškození

a) minimální vzdálenost hrotu mikrometru od hladiny, při níž se ještě neprojevila vztlínavost vody,
b) okamžik přilnutí hladiny vody ke hrotu, přibližujícího se k hladině.



Obr. 30 Vztlínání vody na hrotu mikrometrického šroubu – detail válcovitého zakončení o průměru 2,5 mm

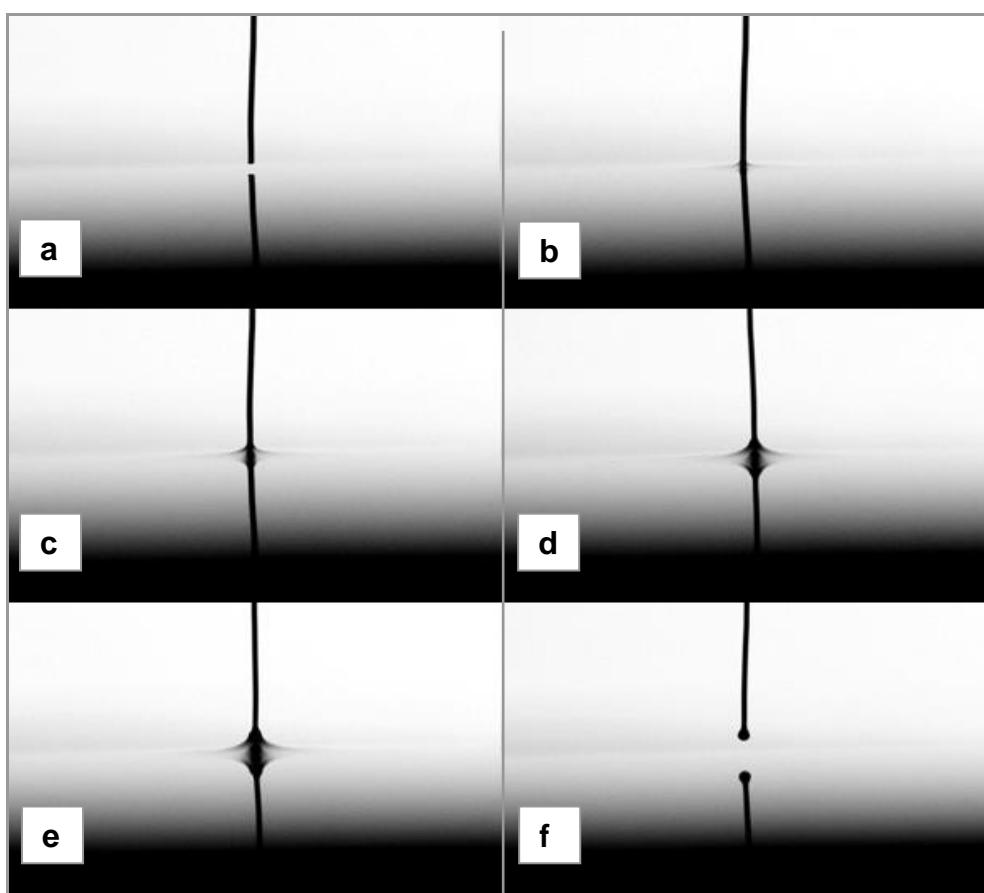
a) minimální vzdálenost hrotu mikrometru od hladiny, při níž se ještě neprojevila vztlínavost vody,
b) okamžik přilnutí hladiny vody ke hrotu, přibližujícího se k hladině, c), d), e) postupné vzdalování hrotu od hladiny, kontakt hrotu s hladinou trvá díky pružnosti hladiny vody, způsobené povrchovým napětím vody, f) okamžik odtržení hladiny od hrotu.



Obr. 31 Koncovka nově vyvíjeného hladinoměru – detail měřicí elektrody speciálně upraveného tvaru o průměru konce 0,2 mm

a) minimální vzdálenost hrotu mikrometru od hladiny, při níž se ještě neprojevila vztlínavost vody,

b) okamžik přilnutí hladiny vody ke hrotu, přibližujícího se k hladině. Koncovka měřicí sondy se tvarem blíží kuželu, ale povrch je vypouklý a tím pádem je konec tupější. Koncovka má větší průměr zakončení než kuželová, ale je méně náchylná k poškození



Obr. 32 Koncovka snímače frekvence kmitání hladiny – detail vlasové redukce o průměru 0,2 mm

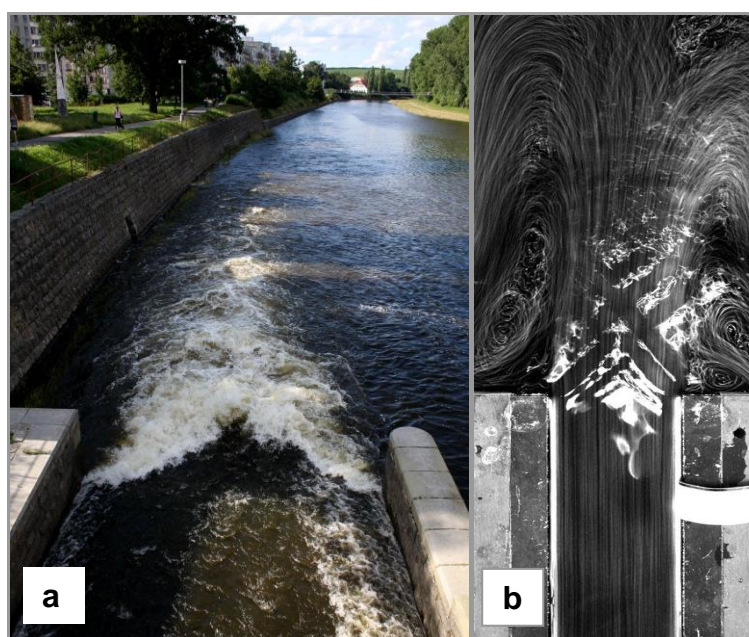
a) minimální vzdálenost vlasové redukce od hladiny, při níž se ještě neprojevila vztlínavost vody, b) okamžik přilnutí hladiny vody k vlasové redukci, přibližující se k hladině, c), d), e) vlasové redukce se vzdaluje od hladiny, f) okamžik odtržení hladiny od vlasové redukce.

5.2.4 Měření frekvence kmitání hladiny

Proud vody, vtékající do modelové sestavy se v některých případech rozkmitá, a to ve směru vodorovném i svislém – viz obrázek č.33.

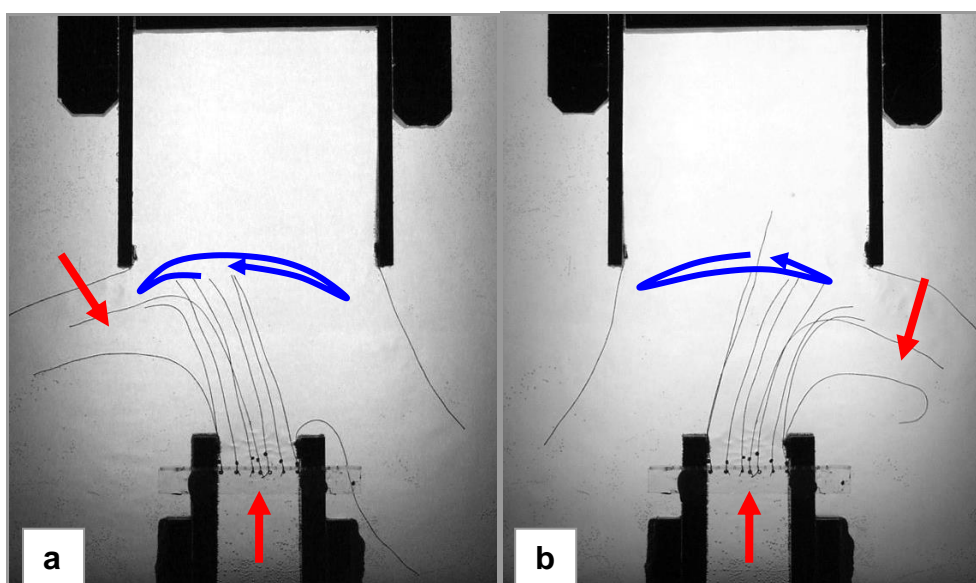
V důsledku kmitání proudu se v jednotlivých místech mění výška hladiny. Tento jev se děje periodicky. Pro stanovení frekvence změn je třeba zjistit, za jak dlouho se opakují krajní

polohy proudu vody ve směru vodorovném a krajní polohy hladiny ve směru svislém. Ke stanovení frekvence pulsací odklánějího se proudu bylo využito označené, uprostřed proudu umístěné nitěné sondy – viz obrázek č.34. Její pohyb byl sledován a měřen čas jejích 10 překmitů přes střední polohu (resp. kmitů do krajních poloh vpravo/vlevo). Metoda je velmi jednoduchá, ideální je pro demonstrační účely, ale při vlastním měření je náročná na čas a na pozornost obsluhy. Pro dosažení relativně přesných výsledků by bylo třeba provádět mnoho měření. Významnými nedostatky jsou omezení pro frekvence změn výhradně ve vodorovném směru a nemožnost podchytit pravidelnost pulsací. Naopak cenné informace poskytuje při výběru míst, vhodných pro měření obrázek č.35.



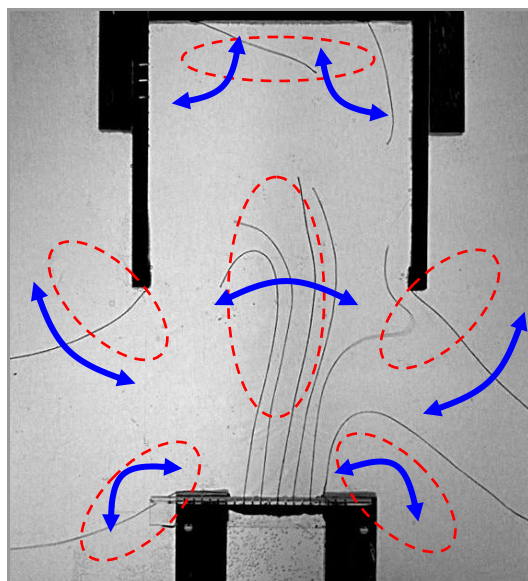
Obr. 33 Rozvlnění proudu – regulovaný proud v řece a v laboratoři

a) plavební kanál na řece Otavě, b) experiment plnění symetrické dutiny – detail ústí přítoku.



Obr. 34 Využití nitěných sond při zjišťování frekvence odklání proudu od původního směru

a) odklon vlevo, b) odklon vpravo. Frekvence kmitání proudu se určují na základě pozorování změny polohy střední nitěné sondy.

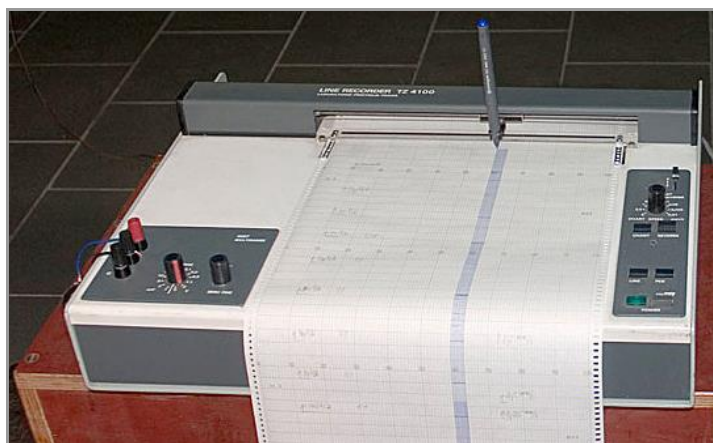


Obr. 35 Měřicí místa vhodná pro měření frekvence pulsací

Výběr měřících (červené oblasti) míst byl proveden na základě pozorování pohybu nitěných sond (modré šipky).

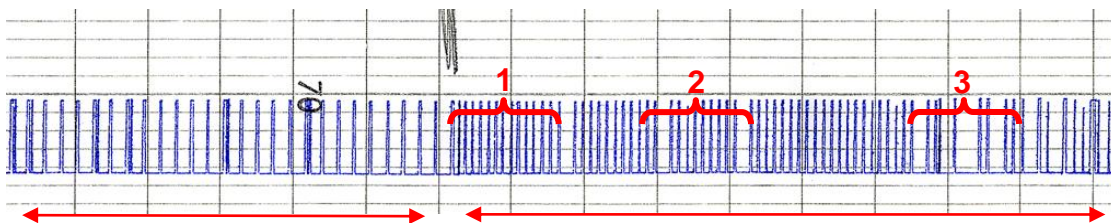
Požadavek měření změny polohy hladiny ve svislém směru dala vzniknout myšlence uzavírání a otevírání elektrického obvodu v závislosti na poloze hladiny. Tento způsob měření by umožnil záznam nejen měnící se vrstvy vody nad rovinným dnem, ale také identifikaci odklánění proudu. Za odklánějícím se proudem vzniká ve vodě prohlubeň a před ním vlna. Principu „otevřeného a uzavřeného elektrického obvodu“ bylo využito při konstrukci snímače frekvence v kapitole 5.2.5, k němuž byl připojen zapisovač na obrázku č.36.

Na grafickém výstupu lze vyhodnotit míru pravidelnosti pulsací²³ a poté se soustředit na konkrétní úseky grafického výstupu – ukázka záznamu je na obrázku č.37. Místa pro měření snímačem jsou vybírána na základě zkušeností s nitěnými sondami – viz obrázek č.38.



Obr. 36 Grafický výstup – zapisovač připojený ke snímači pulsací

²³ Pravidelnost pulsací lze detekovat podle zvukového signálu, vydávaného snímačem, ale z důvodu momentální absence zařízení na vyhodnocování zvukových signálů je používán výhradně výstup ze zapisovače.



Obr. 37 Ukázka grafického výstupu, připojeného ke snímači frekvencí

1 pravidelné pulsy, 2 mírně nepravidelné pulsy, 3 nepravidelné pulsy, a, b záznam je pro dvě dutiny.

Signál ze snímače frekvencí lze digitalizovat použitím osmikanálové osciloskopické karty NI PXI 5105 se vzorkovací frekvencí 60 MHz a rozlišením 12 bitů. Následně se karta připojí přes PXI box k počítači a pomocí aplikace LabView signal expere se zobrazí signál. Výsledkem měření je časová závislost změny napětí. Pro stanovení dominantních frekvencí v časovém záznamu se signál s využitím Fourierovy transformace převede na výkonové spektrum.

Vlastní záznam měření, použitý v kapitole 6.2 pro účely verifikace, byl proveden v prostředí NI SignalExpere 2012. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1 kHz, doba záznamu 10 s.

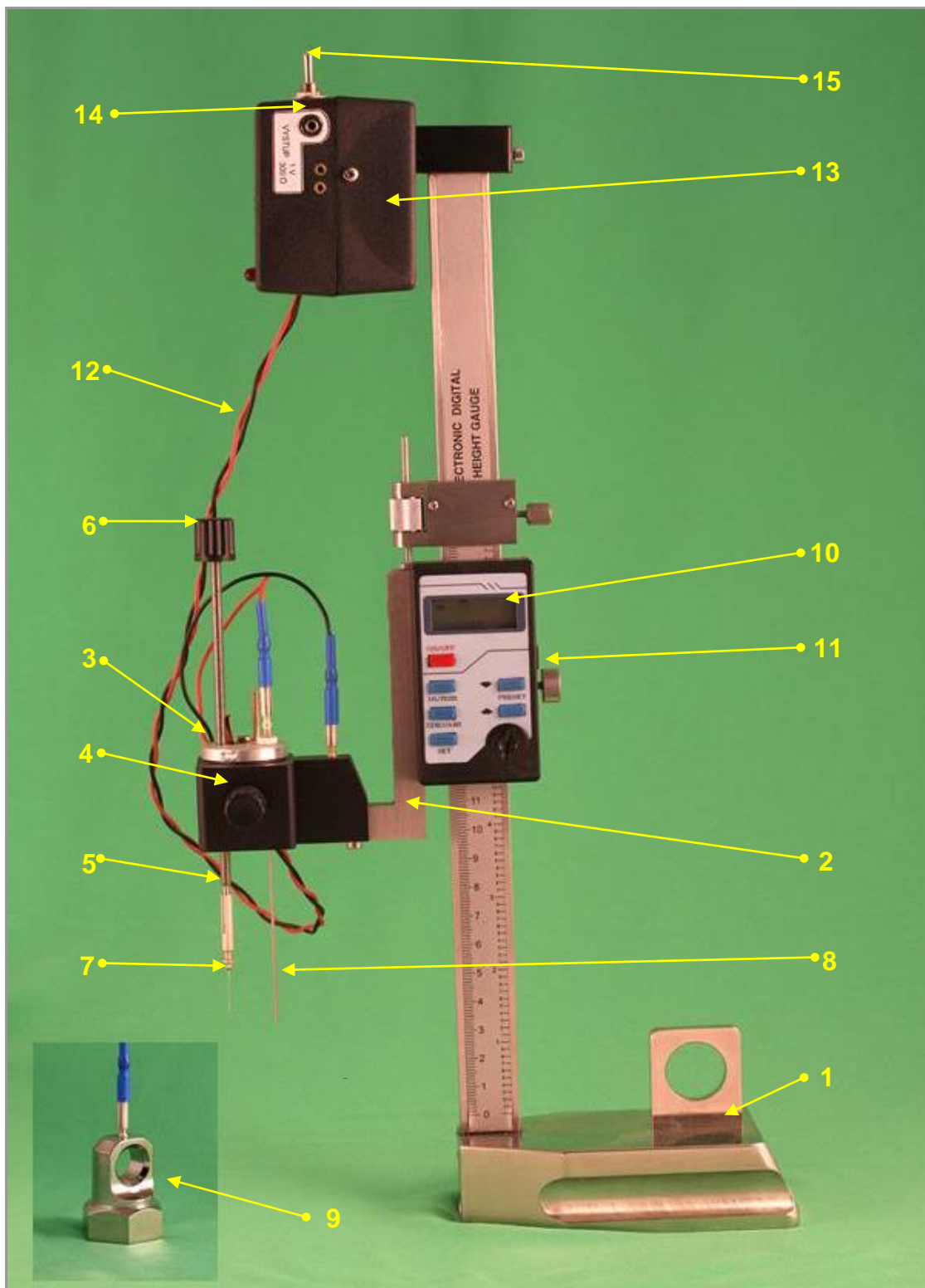
5.2.5 Hladinoměr se snímačem frekvence kmitání hladiny

Nově vyvinutý měřicí přístroj – hladinoměr se snímačem frekvence kmitání hladiny – vznikl kombinací mikrometrického šroubu a měřidla, založeného na elektrické vodivosti měřené kapaliny. Oficiální název měřidla, určený patentovou kanceláří z důvodu možné ochrany je „Snímač hladiny elektricky vodivé kapaliny, zejména výšky hladiny a frekvence jejího kmitání“ – na obrázku č. 38 – [A21], ale v praxi se vžily jiné názvy: „hladinoměr“ a „snímač frekvence“. Hladinoměr slouží k měření malých výšek hladin elektricky vodivých kapalin v kanálu s rovinným dnem – obrázek č.25. Rozsah měřidla je v řádech centimetrů, přesnost je v setinách milimetru. Snímač frekvence vlnění hladiny je určen k bodovému stanovení frekvence kmitání hladiny.

Měření výšky hladiny se provádí v několika krocích. Podstavec měřidla se ustaví na pevnou podložku poblíž místa měření, poté se těleso polohování elektrod sníží tak, aby se teleskopická elektroda ponořila do měřené kapaliny – dále vody. Po povolení stavěcího šroubu polohování elektrod se najde poloha teleskopické elektrody tak, aby neovlivňovala proudění v místě měřicí elektrody, následně se stavěcí šroub opět utáhne. Nelze-li najít vhodnou polohu teleskopické elektrody, je třeba použít místo ní volnou elektrodu, která se může umístit do vody dál od hladinoměru. Nyní se zapne spínač zdroje signálu (i digitálního měřidla). Točítkem ovládaná měřicí elektroda se šroubováním pomalu přibližuje k měřené hladině, a to do té doby, než se hrot dotkne hladiny a uzavře se elektrický obvod a ozve se nepřerušovaný tón. V okamžiku zaznění signálu obsluha přestane pohybovat točítkem elektrody. Reakce na signál musí být okamžitá, v případě nejistoty je třeba elektrodu znovu vyšroubovat tak, aby se přerušil signál a postup zopakovat. Následuje vynulování digitálního měřidla a po povolení stavěcího šroubu nosiče elektrod a ukazatele hodnot se měřicí elektroda opatrně posunuje dolů, až se dotkne dna kanálu a provede se odečtení výšky hladiny.

Pro měření frekvence kmitání hladiny je vhodnější použít volnou elektrodu (i když to není podmínkou) a umístit ji do vody mimo oblast měření. Na měřicí elektrodu se nasadí redukce s vlasovou elektrodou. Točítkem ovládaná vlasová elektroda se šroubováním přibližuje k hladině. Při kontaktu elektrody s kmitající hladinou se ozve přerušovaný tón. V případě, že zazní nepřerušovaný tón, znamená to, že v daném místě hladina nekmitá, anebo že je elektroda ponořena příliš hluboko pod hladinu. Na výstup signálu z akustické jednotky lze

připojit zařízení pro další zpracování: grafický výstup, osciloskopickou kartu, osciloskop, apod.

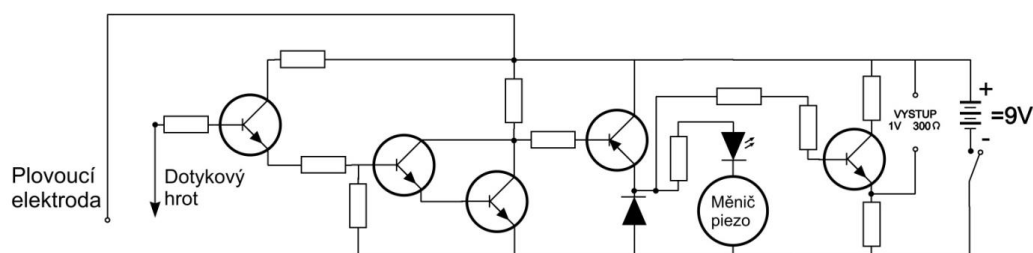


Obr. 38 Hladinoměr se snímačem frekvence vlnění hladiny

1 podstavec, 2 nosič měřících elektrod, 3 těleso polohování elektrod, 4 stavěcí šroub polohování elektrod, 5 stavitelná měřící elektroda, 6 izolované točítka měřící elektrody, 7 vlasová redukce pro měření frekvence kmitání, 8 teleskopická elektroda, 9 volná elektroda, 10 ukazatel hodnot, 11 stavěcí šroub nosiče měřících elektrod a ukazatele hodnot, 12 vodiče, 13 zdroj opticko-akustického signálu, 14 výstup signálu, 15 spínač zdroje signálu.



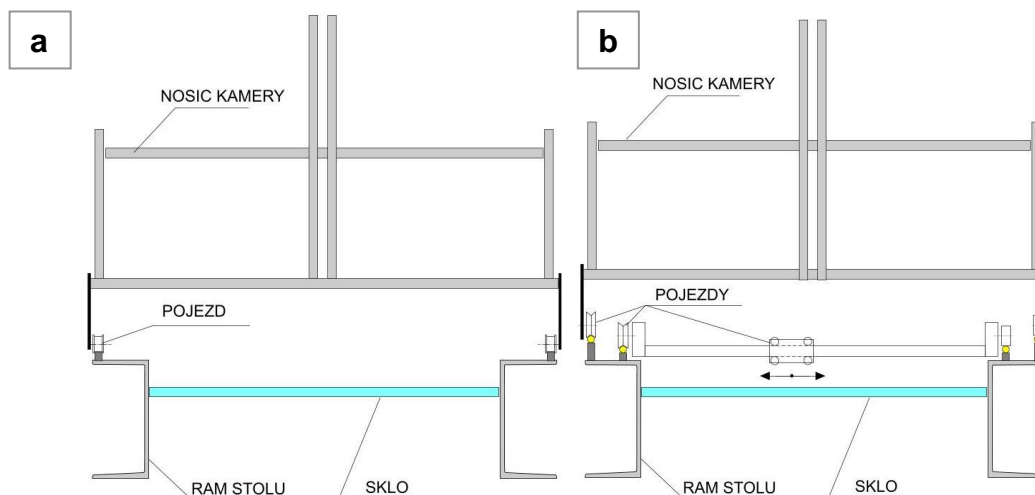
Obr. 39 Detaily elektrod a redukce



Obr. 40 Schéma zapojení opticko-akustického zdroje signálu

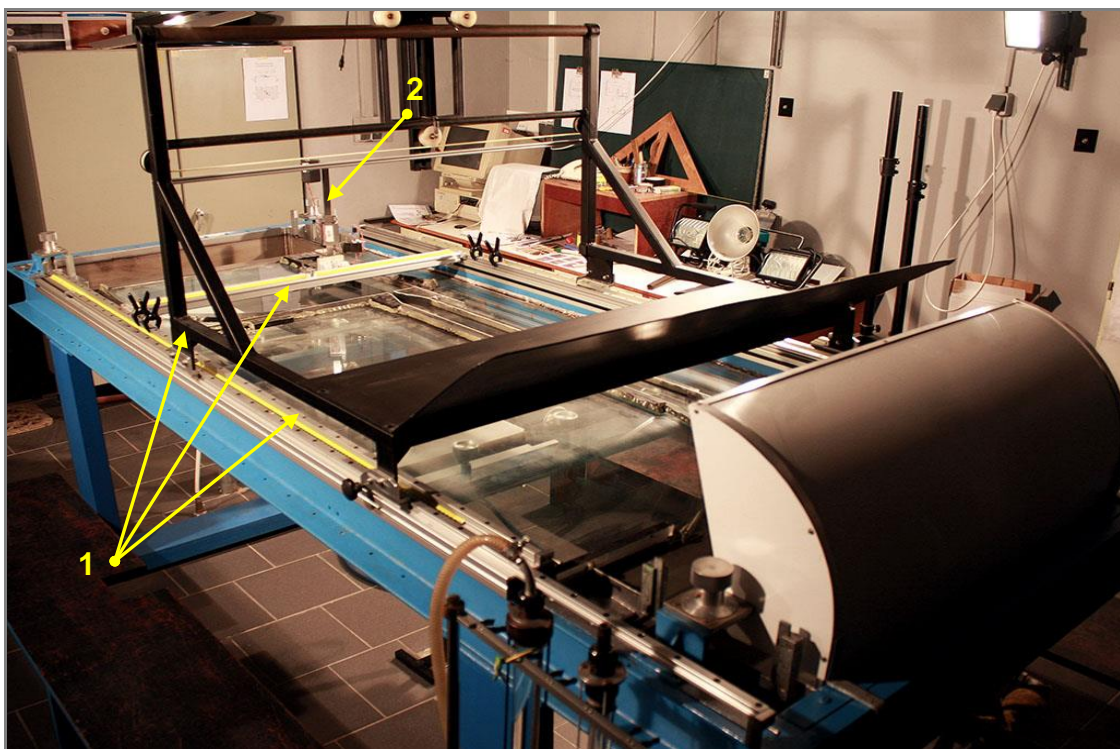
5.2.6 Traverzovací zařízení

V roce 2013 byla realizována montáž navrženého traverzovacího zařízení. Návrh zařízení je na obrázku č.41b, realizace je na obrázku č.42. Stávající jednokolejný pojezd videozáznamu byl demontován a na jeho místo byla umístěna soustava kolejnic (kladkový vedení jednoduchých a dvojitých) s dvěma vzájemně nezávislými příčnými pojedy – viz obrázek č.43. Jeden z podélných pojezdů je určen pro videotechniku, na druhém je speciálně tvarovaná plošina pro měřicí zařízení: snímač (měření výšky hladiny a frekvence pulsací), úchylkoměr a kreslicí zařízení (stavba modelové sestavy), měřicí sondy (měření rychlostí), apod. – viz obrázek č.44. Na obou pojedech jsou plynulé aretace a měřítko, umožňující určení měřících bodů s přesností 1mm v podélném i příčném směru.

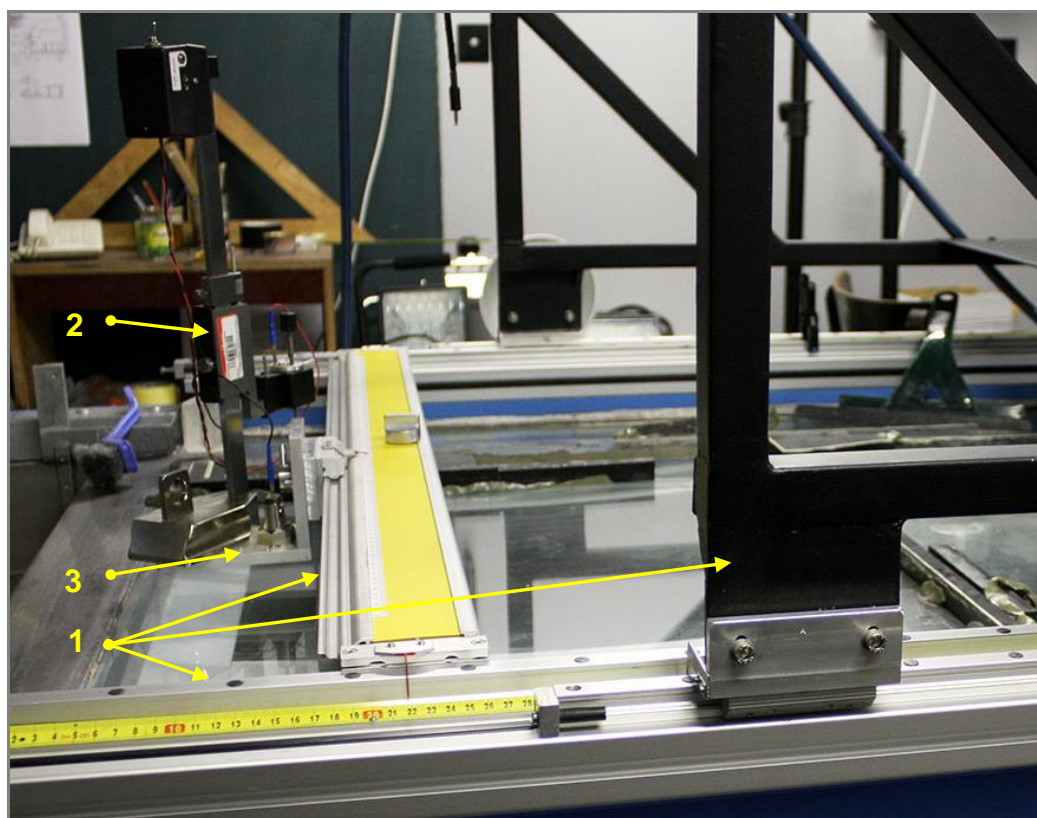


Obr. 41 Návrh traverzéry

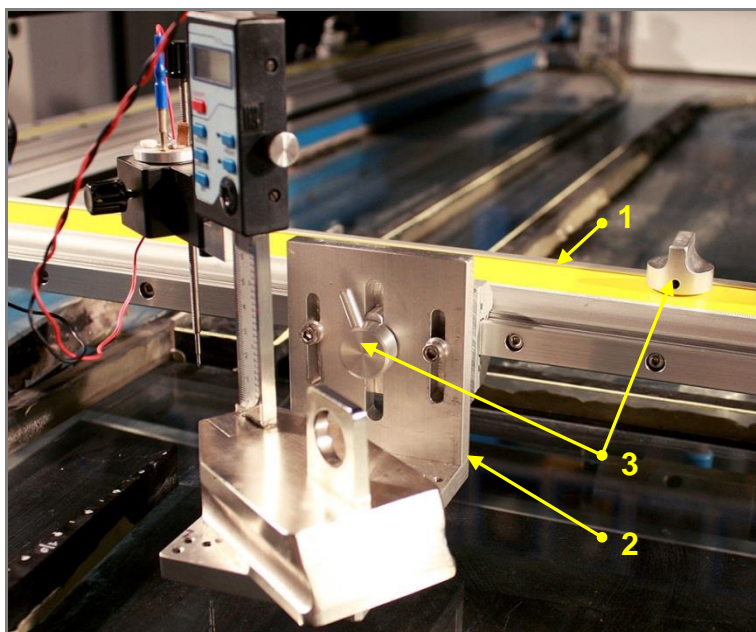
a) původní stav – jediný pojezd záznamové techniky, b) návrh – dva nezávislé pojedy



Obr. 42 Hydrodynamická vana po instalaci nového traversovacího zařízení
1 je traversovací zařízení, 2 je snímač výšky a frekvence pulsace hladiny.



Obr. 43 Detail traversovacího zařízení
1 je traversovací zařízení, 2 je snímač výšky a frekvence pulsace hladiny, 3 je plošina traversovacího zařízení, sloužící k uchycení měřicí techniky



Obr. 44 Detail plošiny s přišroubovaným snímačem

1 je traverzovací zařízení, 2 je plošina traverzovacího zařízení, sloužící k uchycení měřicí techniky, 3 je ovládání aretací

5.3 Funkční možnosti hydrodynamické vany

Funkční možnosti zařízení se týkají proveditelnosti experimentů. Týkají se typu experimentu, vizualizačních metod, vlastností modelu, vlastností vizualizačních ingrediencí, „číselných“ hodnot, metod měření a záznamu experimentu. Vizualizační kapalinou je v případě hydrodynamické vany voda, volba je zdůvodněna v kapitole 2.2.

5.3.1 Typy experimentu

V oblasti proudění mohou nastat tři varianty vzájemného pohybu modelu a proudící vody – podle toho jsou rozlišovány tři typy experimentů:

- první typ – model je v klidu, voda se pohybuje,
- druhý typ – voda je v klidu, model se pohybuje,
- třetí typ – model i voda jsou v pohybu.

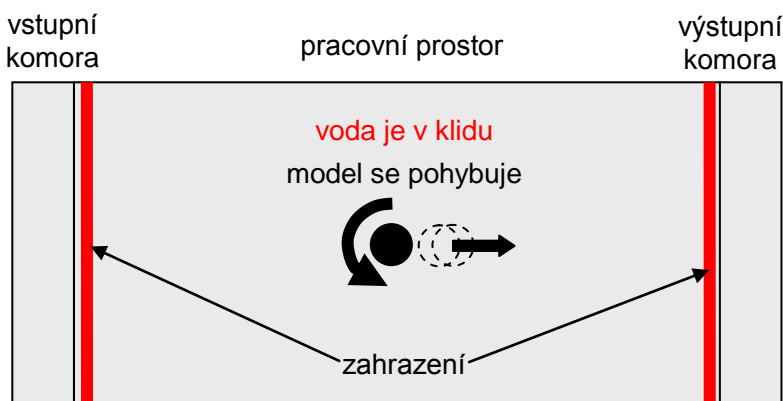
Hydrodynamická vana je primárně konstruována pro **první typ experimentů** – obrázek č.45. Sestava modelu se tmelem upevní na skleněné dno pracovního prostoru, voda z vodovodní sítě vtéká do vstupní komory, z ní do pracovního prostoru, kde vytváří tenkou souvislou vrstvu. Po průtoku modelovou oblastí pokračuje voda do výstupní komory a do odpadu – kapitola. V některých případech se modely šroubují nebo lepí na zvláštní desku, která se potom tmelem připevní ke skleněnému dnu. K uvedenému postupu se přistupuje ve dvou případech, a to u osově symetrických modelových sestav (osa modelu rovnoběžná se směrem proudu kapaliny) a v případě velmi drobných dílů, které tmelem nelze připevnit.

Druhý typ experimentů – obrázek č.46 – vyžaduje zahrazení prostoru mezi modelovou oblastí a výstupní komorou, napuštění vody a následné zahrazení prostoru mezi modelovou oblastí a vstupní komorou. Prostory obou komor je nutné zahradit, nestačí pouze zastavit přítok a odtok, neboť komory jsou hluboké 200 mm a zásoba vody v nich by negativně ovlivňovala experimenty, realizované ve vrstvě víc než 10x menší. Model se vkládá do pra-

covního prostoru, předem napuštěného vodou, miniaturní vrstvička vody pod vloženým modelem dovoluje jeho snadný pohyb. Někdy je vyžadováno, aby byly určité díly modelu vůči vodě v klidu. Na to je třeba pamatovat a tyto části upevnit před napuštěním vody. Rychlost pohybu modelu musí být taková, aby nedošlo k přelití vody přes model a ke vzniku odražených vln. Modelem se může pohybovat přímočaře nebo po oblouku, může konat kmitavý přímočarý nebo rotační pohyb kolem pevné polohy. Pohyby jakkoli zrychlené a nepravidelné lze modelem konat také, lze provést i měření, ale systematické vyhodnocení je obtížné, ne-li nemožné. Náhodně vzniklé efekty lze demonstrovat v rámci zpestření přímých pozorování.



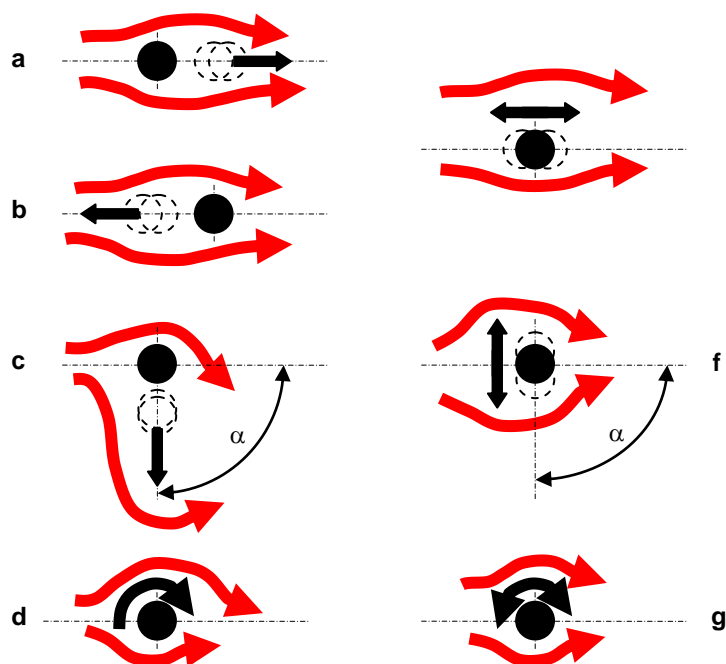
Obr. 45 Schéma uspořádání experimentu prvního typu – voda proudí kolem nehybného modelu



Obr. 46 Schéma uspořádání experimentů druhého typu – model se pohybuje v klidné vodě

Pohyb modelu může být přímočarý, křivočarý, rotační, rovnoměrný, nerovnoměrný, kmitavý.

Třetí typ experimentů kombinuje pohyb taženého modelu vodou, protékající pracovním prostorem. Na obrázku č. Obr. 47 jsou schematicky znázorněny základní kombinace pohybujícího se modelu a proudící vody, u nichž je možno provádět opakovatelná měření. Nepravidelné pohyby modelu lze provádět také, ale se stejným efektem jako u experimentů druhého typu. Rychlost pohybu modelu při experimentech třetího typu se musí volit obezřetněji, protože se kromě modelu pohybuje i voda a vznik nežádoucích efektů je proto snadnější. Kromě přelití vody přes modely a vznik odražených vln může nastat relativní klid – model i voda se pohybují „stejně“ (mají stejnou rychlost, směr i orientaci). Dalším problémem může být mechanismus pro ovládání pohybu modelu. Konstrukce i umístění nesmí překážet při pozorování, měření a fotografování, pohon mechanismu musí být odolný vůči chvění.



Obr. 47 Schéma experimentů třetího typu – voda i model se pohybují

a model i voda se pohybují ve stejném směru i orientaci, b model se vůči vodě pohybuje ve stejném, ale opačně orientovaném směru, c model a voda se pohybují ve směrech, které se odchyľují o úhel α , d model rotuje kolem pevné osy, voda se pohybuje kolmo k ní, e model kmitá kolem pevné polohy ve stejném směru jako voda, f model a voda se pohybují v různých směrech, vzájemně odchyľených o úhel α , model kmitá kolem pevné polohy, g model koná kmitavý rotační pohyb.

5.3.2 Vhodné vizualizační metody

Každé experimentální zařízení má svá specifika a podle nich jsou vybírány vizualizační metody – kapitola 3. Pro hydrodynamickou vanu jsou vhodné tyto typy vizualizačních metod:

- metoda nitěných sond,
- metoda zavádění „proudové trubice“ disperzní tekutiny do objemu proudící vody,
- metoda nanášení kovového prachu na povrch černěné vody.

5.3.3 Modely

Modely se vyrábějí z litého plexiskla, vrchní strana je natřena černou matovou barvou, hrany zvýrazněny bílou nebo žlutou linkou. Obtékané stěny modelu jsou vyleštěny. Fixace modelů na sklo modelového stolu se provádí tmelem, a to tak, aby nebylo narušeno sledované proudění. Obvykle postačí otvory na spodní straně jednotlivých dílů, které se vyplní tmelem a přilepí na suché sklo. Při déletrvajících experimentech, kdy hrozí nebezpečí posunu modelů po skle, se upevnění modelů řeší pomocí magnetů eventuálně přišroubováním modelů na zvláštní plexisklovou desku. K pohybu modelů může dojít vlivem kolísání teplot (den/noc, v zimě víkend/pracovní dny, apod.). Fixace modelů magnety se provádí zapuštěním magnetů do otvorů ve spodní části modelu a silnými magnety, umístěnými pod sklem modelového stolu. Přišroubování nebo přilepení modelů na zvláštní desku je výhodné v případech, kdy je třeba dodržet přesnou vzájemnou polohu částí modelu, například souosť. Celá deska s modelem se poté připevní ke skleněné pracovní desce tmelem eventuál-

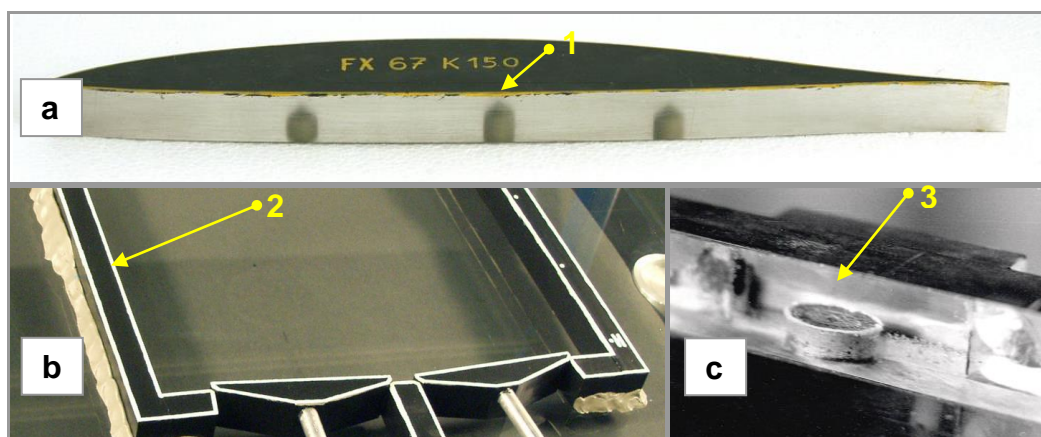
ně magnety. Zvýšenou pozornost je třeba věnovat délce ponoření plexisklové desky, protože se může vlivem nerovnoměrné nasákavosti nepříjemně zvlnit, jak je vidět na obrázku č.26.

Při návrhu dvojrozměrného modelu odpovídajícímu dvojrozměrnému dílu je situace jednodušší než při návrhu dvojrozměrného modelu pro trojrozměrné dílo. Dvojrozměrné nahrazení díla se provede tak, že se všechny průtočné průřezy převedou na obdélníky o zvolené konstantní výšce Z_{DU} a umístí se mezi dvě rovnoběžné roviny. Přitom je třeba zachovat stejné objemy a lze-li, tak i průřezy, kolmé na směr proudu i délku proudových vláken. Šířky kanálů se navrhují tak, aby odpovídaly průřezům skutečných kanálů, délky kanálů se zachovávají. Zachovávají se rovněž zaoblení a úhly ohybů.

Kvalitní modely jsou základem kvalitního experimentu. Jejich vlastnosti musí respektovat pravidla podobnosti a analogie – kapitola 2.1.3, při návrhu je třeba zohlednit:

Velikost modelu musí být taková, aby byly jevy, spojené s experimenty pozorovatelné. Rozměry modelů v rovině hladiny vody musí být v takovém poměru vůči dílu, aby mohly být využity poznatky a závěry hydrodynamické analogie. Výška modelu (tj. rozměr modelu ve směru kolmém k hladině vody) se volí tak, aby model částečně vyčníval z vody. Mělo by to být co nejméně, aby bylo do experimentu dobře vidět, a aby části modelu nad hladinou nestínily. Experimenty se nemohou osvětlovat přímo (kolmo k hladině), protože by se odlesky hladiny odrážely přímo do objektivu. Osvětluje se proto šikmo a neúměrně vysoké modely byly zdrojem stínů. Zároveň ale nesmí být tak nízký, aby hrozilo nebezpečí přelití vody přes model. Při určování ideální výšky modelu se musí počítat s rezervou na lokální zvýšení výšky hladiny při rozkmitání hladiny. Ideální z hlediska pozorování i záznamu by byla situace, kdy by vršek modelu byl v jedné rovině s vodou, ale z výše popsaných důvodů to není možné.

Geometrie modelu vychází z pravidel podobnosti, ale obvykle se modely zjednodušují. Toto zjednodušení je dáno typem experimentu, vizualizační metodou a v neposlední řadě i technickými možnostmi při výrobě modelů. Při konstruování modelů je třeba brát v úvahu nejen jejich tvar, ale překvapivě i tvar a velikost mezer v nich. Pokud by byly příliš úzké, nejen že by do nich nebylo dobře vidět, ale také by mohlo dojít k takovému natěsnání vizualizačních částic (nebo nitěných sond), že by se deformovaly hladinové proudnice.

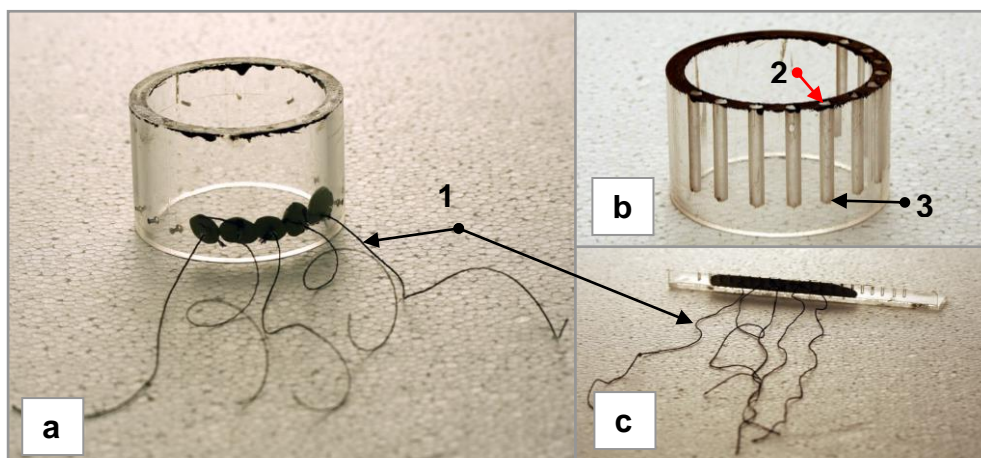


Obr. 48 Příklady modelů a jejich upevnění na sklo modelového stolu

a) upevnění tmelem zdola, b). upevnění z boku, c) upevnění pomocí magnetů, 1 tmelem vyplněný otvor, 2 upevnění modelu ze strany, 3 magnet zapuštěný v modelu.

Povrch modelu musí být vyleštěn a nesmí nijak reagovat s vizualizačními ingrediencemi. Ideálním materiálem je lité plexisklo, protože se dobře obrábí, je dostatečně odolné proti odírání kovovými vizualizačními částicemi, s ostatními vizualizačními ingrediencemi chemicky nereaguje, při manipulaci s jednotlivými díly modelu při experimentech 2. a 3. typu

nehrozí poškrábání skleněné desky pracovního prostoru. Extrudované plexisklo je sice levnější, ale při obrábění praská a ponechá-li se delší dobu (řádově hodiny) ve vodě, na rozdíl od lité formy má schopnost nasáknout vodou a důsledkem je deformace modelů nebo jejich částí. Proces sice není nevratný, ale vysychání modelů komplikuje situaci.



Obr. 49 Model s nitěnými sondami a kanálky pro přívod barvy

a) nitěné sondy umístěné na obtékaném povrchu, b) model s kanálky pro zavádění barviva na obtékaném modelu, c) hřebenový držák nitěných sond, sloužící k umístění mimo obtékaný povrch, 1 nitěné sondy jsou provlečeny otvory ve stěně modelu, z vnitřní strany jsou přilepeny tmelem, 2 kanálky pro barvivo, 3 vyústění kanálků ve stěně modelu.

5.3.4 Vlastnosti vizualizačních ingrediencí

Vlastnosti vizualizačních ingrediencí – kapitola 2.2.2 – ovlivňují průtok vody sestavou experimentu. Sleduje se zejména hustota, viskozita a povrchové napětí rozpuštěných barviv a disperzí, velikost prachových částic, koncentrace roztoků, rozpustnost barev, pěnovost, schopnost tekuté barvy tvořit dostatečně dlouhá a zřetelná vlákna. Vodou unášený kovový prach a barvivo ulpívají na modelech, v mezerách, sedimentují na dně kanálu, zanášejí úzké mezery. Při nešikovné manipulaci mohou vizualizační ingredience ucpat vtokové trysky dávkovačů. Je důležité dodržet poměr barviva, vody, kovového prachu a povrchově aktivních látek, vše dokonale promíchat, ale nenapěnit. Při výčtu vlastností „vizualizačních ingrediencí“ nelze opominout nitěné sondy, které sice nejsou ingrediencemi v pravém slova smyslu, ale ke zviditelnění slouží stejně jako ony. Nitěné sondy musí být z přírodního materiálu, odmaštěné a beze stop po vizualizačních ingrediencích. Níť se při experimentu nesmějí dotýkat dna ani hladiny a aby se vzájemně nezamotávaly a nezachytávaly se v sestavě modelu.

5.3.5 Číselné hodnoty vstupních podmínek

„Číselné“ hodnoty se týkají limitních (převážně maximálních) hodnot, při nichž zařízení spolehlivě pracuje. Patří sem:

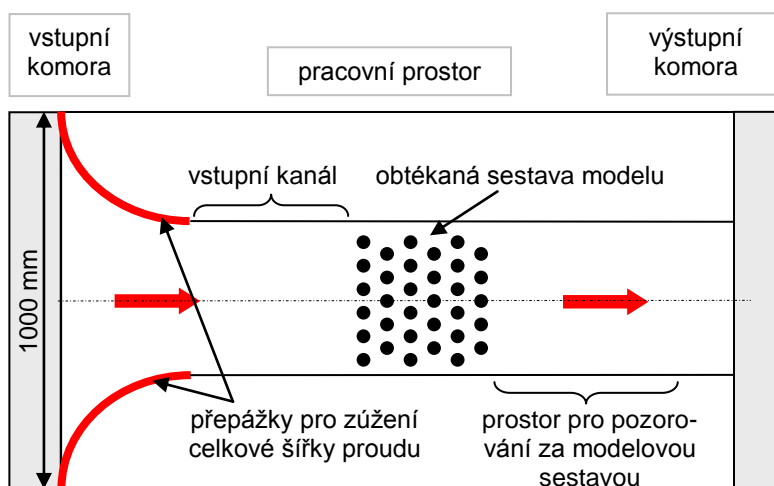
- *průtok vody,*
- *časový limit pro jednu sérii experimentů,*
- *poměr velikosti modelu a pracovního prostoru.*

V souvislosti s hydrodynamickou vanou je první „číselnou“ hodnotou nepřehlédnutelná voda – respektive **průtok vody**. Voda se odebírá přímo z vodovodní sítě, v níž občas dojde k poklesu tlaku, a v důsledku toho samozřejmě poklesne průtok vody zařízením. Průtočné množství je definováno objemovým průtokem, stlačitelnost vody je nepatrná, tedy zanedba-

telná. Maximální hodnota objemového průtoku činí $800 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ – kapitola 5.2.1, ale spolehlivě dosažitelný a udržitelný objemový průtok je $600 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Při experimentech s proudící vodou je velikost průtoku důležitá pro stanovení rychlosti proudění. Obvykle není využita celá šířka zařízení (1000 mm), šířka proudu, vycházejícího ze vstupní komory se upevněním speciálně tvarovaných přepážek plynule zúží tak, aby ve vstupním kanálu bylo dosaženo požadované rychlosti. Vstupní kanál musí být dostatečně dlouhý, aby se eliminovaly jevy, vzniklé při plnění vstupní komory z vodovodu – viz obrázek č.50.

Druhou „číselnou“ hodnotou je maximální **časový limit pro jednu sérii pokusů**. Voda i vizualizační ingredience přicházejí do kontaktu ve vstupní komoře a bezprostředně za ní, a společně tečou do pracovního prostoru. Vzdálenost, kterou přitom urazí, se pohybuje v hodnotách kolem 800 mm . Jakákoli změna v objemech přitékající vody a příslušných ingrediencí není v prostoru pracovního prostoru zařízení zjištělná, protože je obvykle kombinací několika faktorů, vzájemně provázaných a ještě se projeví s mírným zpožděním. Aby byl experiment proveden při konstantních tocích, nelze během něj měnit objemový průtok vody ani přerušovat dodávku vizualizačních částic či barviv. Voda může téci stále, ale vizualizační ingredience je třeba doplňovat. Časový limit pro kontinuální přívod vizualizačních ingrediencí je tedy závislý na velikosti jednotlivých zásobníků a byl stanoven opakovanými zkouškami při plném otevření trysek a kompletním vyprázdnění náplní.

Třetí „číselné“ hodnoty se týkají **poměru velikosti modelu a pracovního prostoru**, a to ve směru podélném (vstupní komora – výstupní komora) i ve směru příčném. Je nutné, aby kolem modelu bylo dost místa: mezi vstupní komorou a modelem se musí vstupující proud uklidnit (dostatečně dlouhý vstupní kanál), za modelem musí být prostor pro pozorování vzniklých jevů, v příčném směru také nesmí být příliš těsno – viz obrázek č. Obr. 50. Při nedodržení potřebného prostoru hrozí řada rizik, zejména nežádoucího přilnutí proudu a zpětných odrazů vln. Podobná pravidla platí i v případě, kdy se model pohybuje – neměl by být tažen příliš blízko stěn.



Obr. 50 Zúžení proudu, poměr velikosti modelu vůči pracovnímu prostoru

5.3.6 Měřené veličiny

Metody měření jednotlivých veličin závisejí na použitém měřicím zařízení a na účelu prováděného experimentu. Mezi měřené hodnoty patří hodnota průtočného množství, ale v hydrodynamické vaně se jedná o vstupní podmínku, která se nastavuje před každou sérií měření. V souvislosti s nově vyvinutým hladinoměrem a snímačem frekvencí lze provádět poměrně přesná měření:

- *měření lokální výšky hladiny* – kapitola 5.2.3,
- *měření frekvencí kmitání vlnící se hladiny* – kapitola 5.2.4,
- *měření frekvence kmitání pulsujícího proudu* – kapitola 5.2.5.

5.3.7 Metody záznamu experimentu

Velmi důležitým bodem, podílejícím se na úspěšné prezentaci experimentu, je jeho záznam. Přestože jsou k dispozici kvalitní fotoaparáty a videokamery a existují možnosti dodatečných úprav digitálního obrazu, je třeba věnovat pozornost dokonalému osvětlení včetně zamezení nežádoucích stínů a odlesků. Při měření frekvencí kmitání hladiny je ke snímání frekvencí připojen grafický výstup – zapisovač frekvencí kmitání hladiny – kapitola 5.2.4. Experimenty lze dokumentovat takto:

- *fotoaparátem,*
- *videokamerou,*
- *grafickou jednotkou.*
- *osciloskopickou kartou.*

6 Experimenty

6.1 Přehled realizovaných experimentů

V rámci disertační práce bylo realizováno mnoho experimentů: experimenty, při nichž byly testovány funkční možnosti hydrodynamické vany (a příslušenství) a experimenty s dutinami, tedy ty, které jsou předmětem výzkumu.

Testovací experimenty jsou „nedílnou součástí“ disertační práce, protože dokumentují vývoj zařízení, příslušenství, metod a výsledků, dosažených v průběhu 8 let. Kvůli velkému rozsahu příloh jsou v samostatné publikaci [A3]. Byly realizovány tyto experimenty:

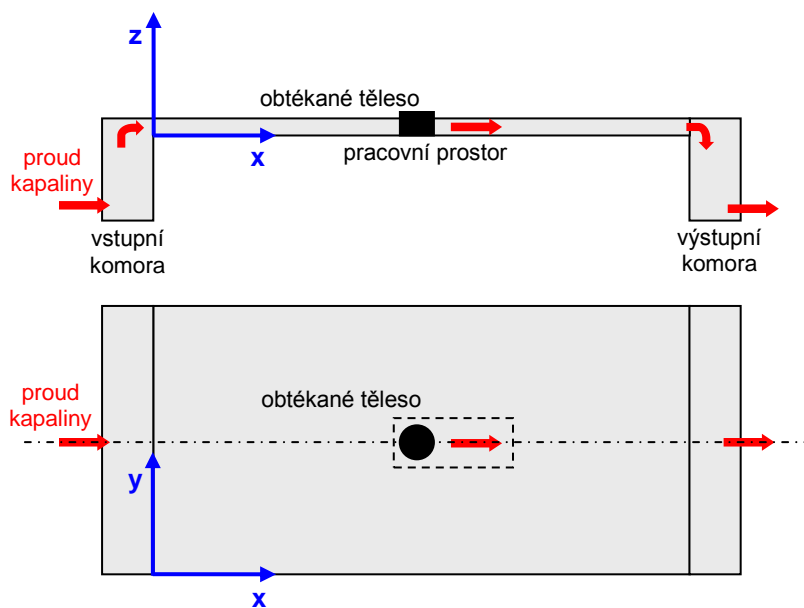
- *obtékání válce v úzkém kanále,*
- *obtékání válce v rozlehlém kanále,*
- *obtékání jedné řady těles,*
- *obtékání skupiny těles,*
- *průtok tekutiny mezerou konvexně-konkávního ozubení,*
- *proudění v dutině s pístem,*
- *plnění symetrické dutiny,*
- *plnění nesymetrické dutiny.*

Pro **experimenty s dutinami** byly navrženy dvě modelové sestavy, a to tak, aby byl kontinuální přítok neperiodického charakteru schopen vybudit a při nezměněných podmínkách udržet vzniklé periodicky se opakující jevy. Obě modelové sestavy jsou tvořeny dutinou, umístěnou proti přítokovému kanálu s tryskou na konci. Tryska je nasměrována do dutiny, osa trysky a dutiny jsou totožné (symetrická úloha) nebo rovnoběžné (nesymetrická úloha), podle toho byly nazvány experimenty:

- *plnění symetrické dutiny,*
- *plnění nesymetrické dutiny.*

Až na pár výjimek byly veškeré experimenty provedeny metodou nanášení kovového prášku na hladinu obarvené vody. U každého experimentu je vysvětlen účel, popsány podmínky, komentován průběh a přínos. Veškeré experimenty jsou řazeny chronologicky, publikace, které přitom vznikly, jsou uvedeny v seznamu literatury.

Pro snadnější orientaci v dílčích experimentech jsou vždy uvedeny doplňující symboly a označení, schéma experimentu, ukázky výstupů (obrázky, grafy, porovnání s numerickou simulací), případně odkaz na příslušnou přílohu nebo publikaci. Souřadný systém xyz je pravoúhlý, rovina xy odpovídá rovině hladiny, osa x představuje hlavní směr průtoku vody, osa z odpovídá výšce vodní hladiny (tloušťce vrstvy vody) – viz obrázek č.51.



Obr. 51 Pravoúhlý souřadný systém v experimentálním zařízení

x je podélný směr proudění (voda proudí rovnoběžně s delší stranou experimentálního zařízení resp. od vstupní k výstupní komoře), y je příčný směr, z je svislý směr (výška hladiny)..

V souvislosti s experimenty je třeba připomenout, že hydrodynamická vana je zařízení, v němž se pracuje s malou vrstvou vody, odpovídající rovině xy , což znamená, že nic ve směru osy z , nemělo by být uvažováno. Jenže takto to nelze interpretovat, protože výška hladiny hraje důležitou roli. Hodnota vodní vrstvy resp. výška hladiny je nutná při určování střední rychlosti proudění vody v zařízení (určuje-li se výpočtem z rovnice kontinuity) a v rámci hydrodynamické analogie (určuje-li se určit tlak v plynu).

6.2 Metodika provádění experimentů v hydrodynamické vaně

Metodika byla vyvinuta na základě zkušeností, získaných během studia, realizace testovacích experimentů, vývoje snímače a konstrukce traverzéru.

Při proudění mohou nastat různé režimy proudění. V případě laminárního proudění se jedná o malé rychlosti a výška hladiny je relativně stabilní. Při vyšších rychlostech proudí voda v turbulentním režimu, charakterizovaném vznikem vírových struktur. Postupně se tvořící víry vznikají na různých místech, v průběhu času mění svoji velikost, tvar, charakter rotace a polohu. Vzájemně si předávají energii – víry s nejvyšší energií – obvykle to jsou ty největší, ale mohou to být také ty s nejsilnější intenzitou rotace – k sobě přitahují víry o nižší energii. Jakmile k tomu dojde, silné velké víry je k sobě připojí a samy sebe tím buď zvětší, anebo z pozice silnějšího obrátí směr rotace slabších či menších vírů do protisměru. Tyto bouřlivé děje se samozřejmě projeví změnou tloušťky vodní vrstvy v jednotlivých místech. Tam, kde je proudění nejrychlejší, se vrstva vody ztenčí, v místech proudění proti překážce či protisměrnému proudu, se vrstva vody zvětší, hladina se všelijak naklání a vlní. V místech relativně klidných se pak vlivem gravitace voda snaží zaujmout stabilní vodorovnou polohu. Oblasti nemají stálou polohu, dočasný klid je brzy narušen vlivem nového přítoku nebo odtoku vody. Popsané pulsační procesy se jeví jako náhodně vzniklé, vypadají chaoticky, ale ve skutečnosti mívají pevný řád: při konstantních vstupních a okrajových podmínkách jsou periodické.

Vzniklé pulsace vody se projeví nejen v oblasti modelu, kde je to svým způsobem očekáváno, ale také v oblasti vtokového kanálu. Zde to způsobuje problémy při určování rychlosti, neboť mění-li se při konstantním průtočném množství průtočný průřez, mění se také rychlost proudění. Vliv „zpětných“ toků by bylo možno zmenšit velmi dlouhým vstupním kanálem, případně prostorem odtoku, ovšem je nasnadě, že účelné délky přesahují možnosti i tak rozměrného zařízení, jakým je hydrodynamická vana.

Při experimentování je obvyklým kritériem vstupní rychlost proudění, kterou lze měřit nebo vypočítat – viz kapitola 5.2.2, Pro realizované experimenty byla ve všech případech použita střední rychlost, vypočítaná z rovnice kontinuity.

Obvyklý trojrozměrný přístup předpokládá, že výška hladiny v kanále je jiná než v trysce $h_K \neq h_T$.

Cílem disertační práce je ale dvojrozměrná analýza experimentu, podpořená numerickou simulací, takže bylo uvažován dvojrozměrný přístup. Ten předpokládá, že výšky hladiny ve vstupním kanále h_K a výška hladiny ve zúžení – trysce h_T jsou stejné

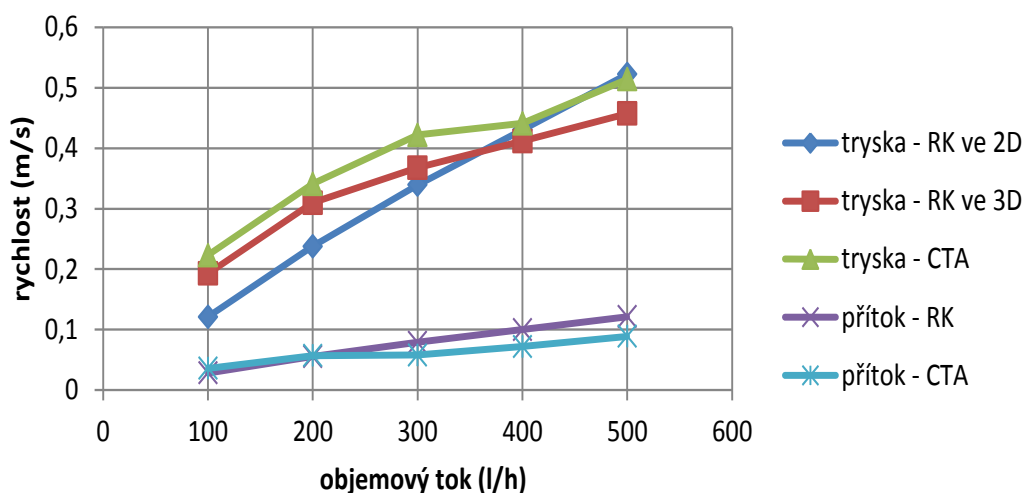
$$h_K = h_T, \quad (6.1)$$

a rovnice kontinuity má pak tvar:

$$\dot{V} = w_K \cdot y_K \cdot h_K = w_T \cdot y_T \cdot h_K, \quad (6.2)$$

kde je $w_K (m \cdot s^{-1})$ je rychlost proudění v kanálu, $w_T (m \cdot s^{-1})$ je rychlost proudění v trysce, $y_K (m)$ je šířka kanálu, $y_T (m)$ je šířka trysky a $\dot{V} (m^3 \cdot s^{-1})$ je průtočné množství. Toto „zjednodušení“ je použito i při 2D numerické simulaci úloh, kdy se stejný průtok se musí „protlačit zúžením“.

V grafu č.4 jsou porovnány hodnoty střední rychlosti v přítokovém kanále a v ústí trysky, změřené metodou CTA, vypočtené z klasické rovnice kontinuity a vypočtené z rovnice kontinuity ve zjednodušeném dvojrozměrném přístupu. Měření byla realizována v kanále o šířce 86 mm a v trysce o šířce 20 mm, a to pro pět průtočných množství. Výšky hladin byly měřeny hladinoměrem v polovině 1 m dlouhého přítokového kanálu a v ústí trysky.

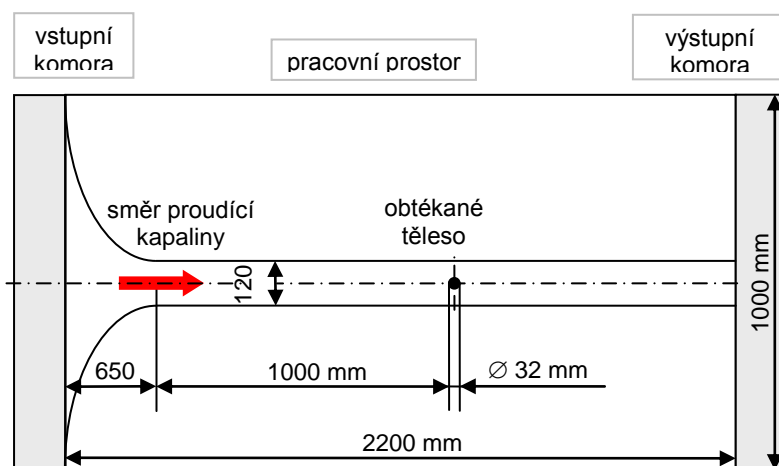


Graf 4 Střední rychlosti proudění v přítokovém kanálu w_K a v trysce w_T v závislosti na objemovém toku \dot{V} – porovnání hodnot pro různé přístupy výpočtu (2D a 3D) a pro měření metodou CTA

Maximální odchylka mezi jednotlivými metodami určení střední rychlosti byla zjištěna $0,075 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při výzkumu periodických jevů je významnou veličinou frekvence. Metoda určení frekvence samobuzených kmitů tak, jak je uvedena v rámci disertační práce, je nová, takže ji bylo třeba verifikovat. K tomu byly použity videozáznamy vizualizace, numerické simulace a z hlediska zpracování dat ze snímače byla použita osciloskopická karta – 5.2.4. Jako vhodný experiment pro verifikaci metody byla vybrána úloha obtékání válce v kanále. Důvodem tohoto výběru byla skutečnost, že problematika obtékání válce je propracovaná a výsledky vizualizace jsou známé. První pokusy a výsledky experimentu jsou uvedeny v publikaci [A3]. Experiment „obtékání válce“ byl několikrát opakován pro různé rozměry a režimy. Pro verifikaci byl vybrán experiment obtékání válce v kanále, a to pro jedinou šířku kanálu a pro dva různé průměry válce.

Model válců byl zhotoven z novodurových trubek o vnějším průměru 32 mm a 50 mm a výšce 25 mm . Celková šířka pracovního prostoru 1000 mm byla v úseku o délce na 650 mm plynule zúžena na šířku kanálu 120 mm . Úpravou šířky průtočného profilu, zejména jeho zužováním, lze dosahovat vyšších vstupních rychlostí, aniž by se muselo zvýšit průtočné množství vody zařízením. Délka vstupního kanálu činila 1000 mm , délka prostoru za modelem byla o něco kratší, ale 518 mm^{24} dlouhý prostor je vzhledem k délce modelu 32 mm resp. 50 mm pro vývoj úplavu a stezky za ním vyhovující. Schéma uspořádání experimentu je na obrázku č.52.

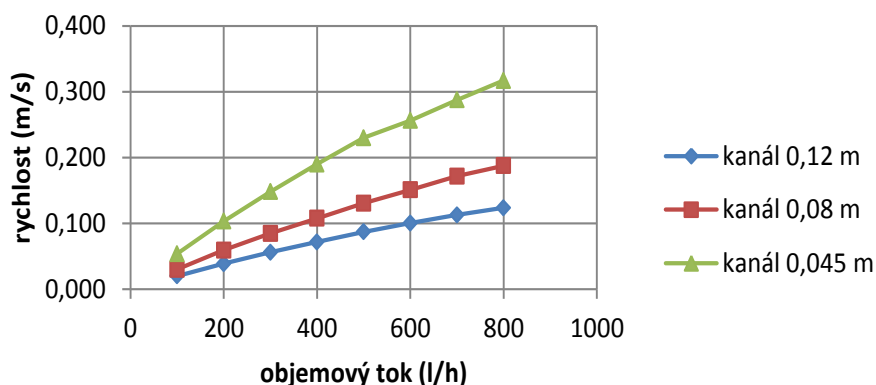


Obr. 52 Schéma experimentu obtékání válce v úzkém kanálu

Při experimentech bylo kontrolováno nastavení podle objemového toku, ale při vyhodnocování a snadnější představu je někdy vhodnější uvést odpovídající rychlost. S hodnota objemového toku neodpovídá jediné rychlosti, záleží na průtočném profilu. Následujícím grafu č.5 je vynesena závislost rychlosti vody v přítokovém kanále na objemovém toku pro tři velikosti (šířky) kanálu.

Vizualizace byla prováděna třemi metodami – metodou nanášení prachových částic na hladinu obarvené vody, metodou zavádění tekuté barvy do objemu proudící vody a metodou nitěných sond. Během zkoušek bylo laděno množství barvy pro obarvení vody, dále byly zkoušeny různé vizualizační částice – lycopodium, mosazný a hliníkový prášek – obojí o neznámé velikosti částic.

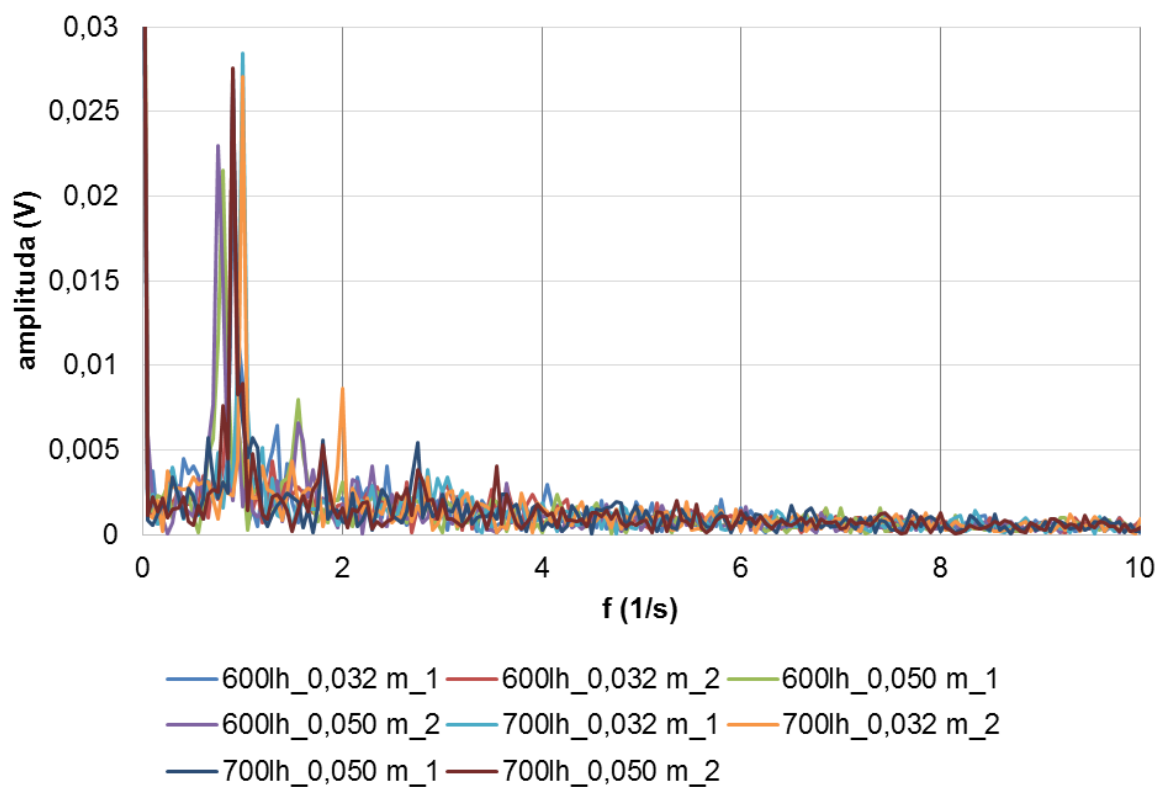
²⁴ Hodnota 518 mm byla vypočtena z rozměrů pracovního prostoru hydrodynamické vany tak, že od celkové délky skla byla odečtena délka zúžení, délka vstupního kanálu a délka modelu.



Graf 5 Rychlost w_k v přítokovém kanále v závislosti na objemovém toku \dot{V}

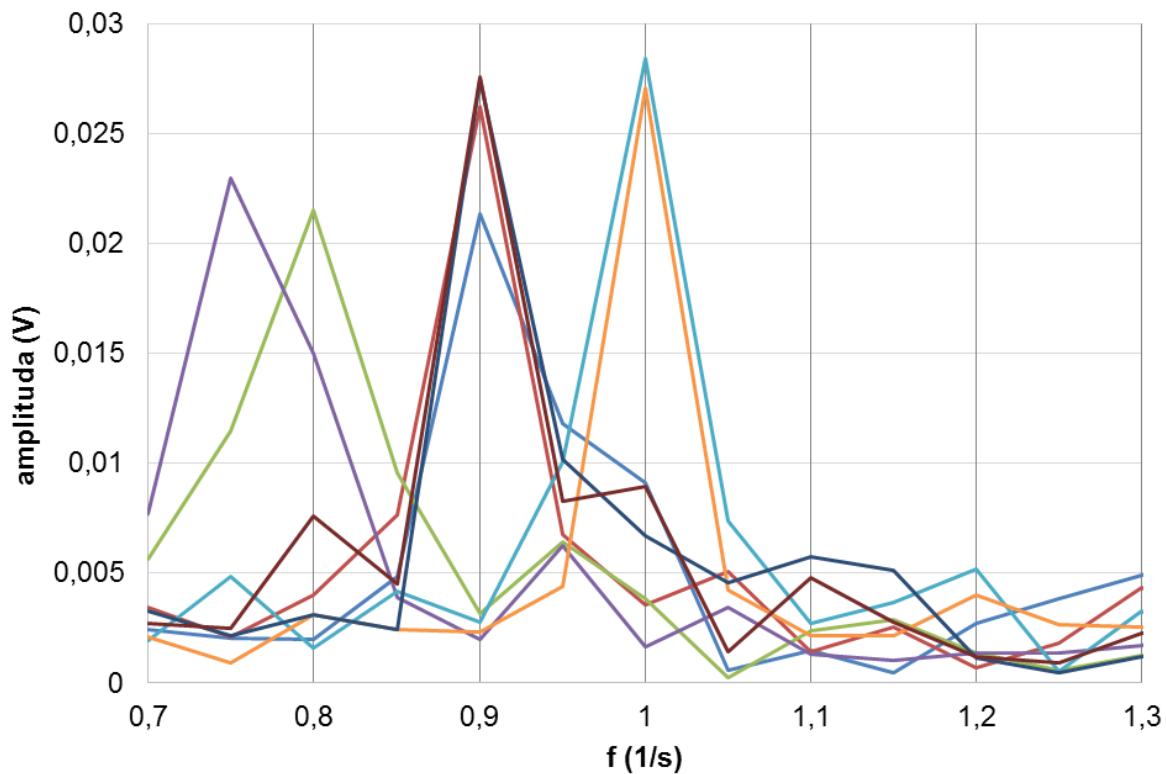
Z experimentů resp. z vyhodnocení pořízených fotografií vyplynulo, že ideální z hlediska vzájemného kontrastu mezi vodou a vizualizačními částicemi je hliníkový prášek. V rámci opakovatelnosti experimentů bylo nutné stanovit, jakou velikost mají mít prachové částice – byly provedeny zkoušky s částicemi o velikosti $20\ \mu\text{m}$ a $60\ \mu\text{m}$. V nich dopadl lépe jemnější hliník, neboť se pomaleji usazoval na dně kanálu. Problematická byla situace s nanášením hliníkového prachu – samotný prášek na hladinu nanášet nelze, protože by nevytvořil pravidelnou strukturu shluků na hladině – obrázky č. 6, 7 a 8. Je třeba vytvořit disperzi z vody, hliníku a povrchově aktivní látky. Disperze musí být použita ihned po namíchání, jinak hliníkový prach klesne ke dnu zásobníku a ucpe trysky pro rozprašování. Jakékoli pokusy o dodatečné rozmíchání usazeného hliníku vedly k nežádoucímu napěnění. Byly zkoušeny různé typy „smáčedel“, vyhovovala pouze látka, přidávaná do prostředků pro čisticí stroje se sníženou pěnivostí. Jedná se o dosti drahou látku (Ufarol), jejíž vzorek byl získán z podniku Severochema Liberec.

Frekvence vzniku vírů za válcem byla jako první naměřena snímačem frekvencí. Vyhodnocení měření bylo provedeno analýzou grafického výstupu a ověřeno osciloskopickou kartou. Poté byl jev vizualizován, natočen videokamerou a z videozáznamu byly určeny frekvence. Stejný model byl simulován ve Fluentu a byly stanoveny frekvence. Rychlost byla určena výpočtem z rovnice kontinuity (6.2) pro nastavené objemové průtoky v rozmezí $200 \div 800\ \text{l} \cdot \text{h}^{-1}$. Rozdíly v počtu „měření“ se liší, protože při nízkých průtocích nebyly frekvence měřitelné, ale na videu se daly rozpoznat. Simulace ve Fluentu byla provedena pro vyšší rychlosti proudění, odpovídající průtočným množstvím $400, 500, 600, 700$ a $800\ \text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ pro válec $32\ \text{mm}$ a $500, 600, 700$ a $800\ \text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ pro válec $50\ \text{mm}$. Simulace byla realizována prot, aby se ověřila měření snímačem a právě při nižších rychlostech byly frekvence neměřitelné. Ověření vyhodnocování grafického snímače osciloskopickou kartou – viz grafy č.6 a 7 – bylo vzhledem k dostupným možnostem zařízení (objem zpracovaných dat) pouze orientační a bylo realizováno pouze pro objemové toky 600 a $700\ \text{l} \cdot \text{h}^{-1}$.



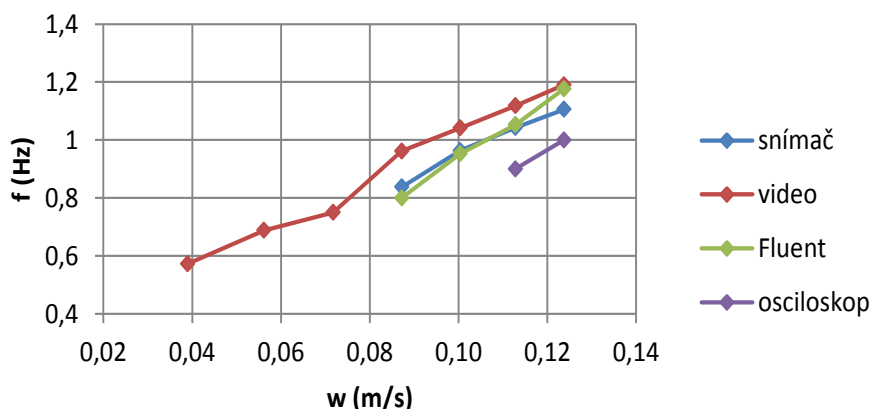
Graf 6 Osciloskopická karta – zpracovaný výstup pro výběr dominantních frekvencí, zjištěných snímačem frekvence

Dvojí měření pro dvě průtočná množství a dva průměry obtékaného válce.



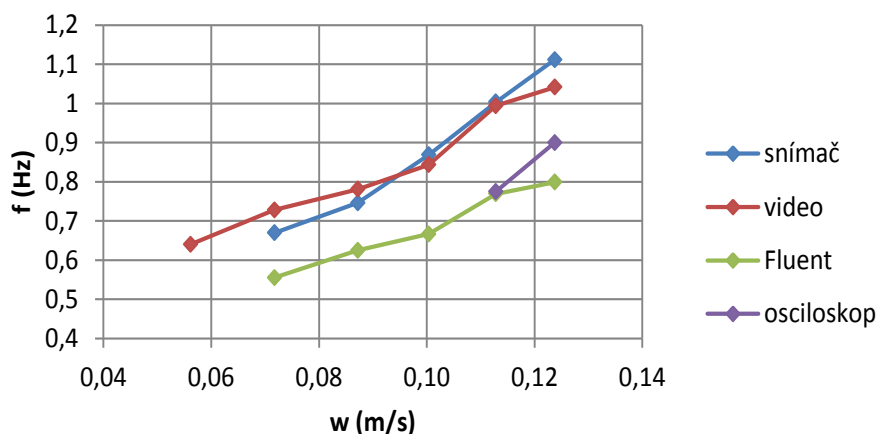
Graf 7 Dominantní frekvence – detail grafu č. 6

Na následujících dvou grafech (č.8 a 9) jsou porovnány rychlosti proudění, získané výše uvedenými metodami: snímačem, analýzou videa, numerickou simulací (Fluent) a osciloskopickou kartou (osciloskop).



Graf 8 Frekvence f pulsací proudu za obtékaným válcem o průměru 32 mm v závislosti na střední rychlosti proudu w_T

Porovnání metod určení frekvencí (snímač frekvence kmitání vodní hladiny, analýza videozáznamu vizualizace, numerická simulace, osciloskopická karta).



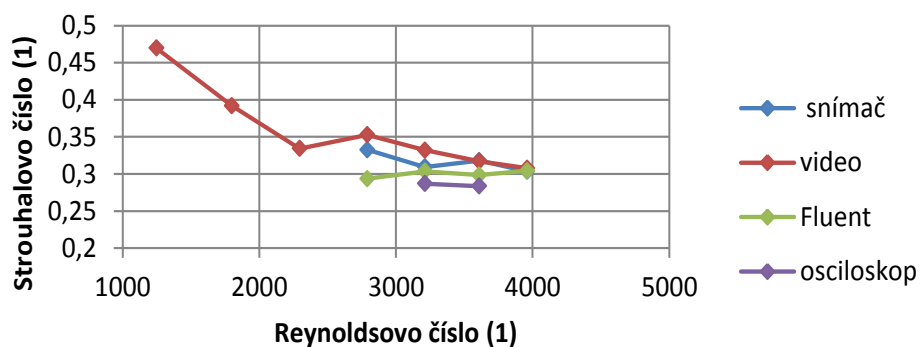
Graf 9 Frekvence f pulsací proudu za obtékaným válcem o průměru 50 mm v závislosti na střední rychlosti proudu w_T

Porovnání metod určení frekvencí (snímač frekvence kmitání vodní hladiny, analýza videozáznamu vizualizace, numerická simulace, osciloskopická karta).

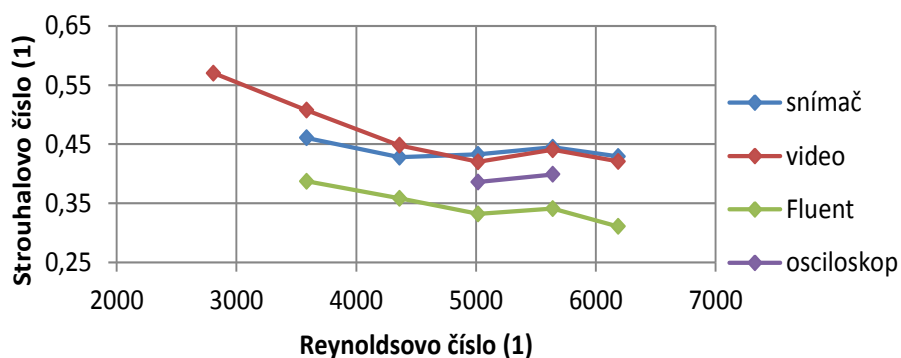
Při studiu nestacionárních toků kapalin jsou základními kritérii hodnocení Reynoldsovo číslo a Strouhalovo číslo. Tato kritéria zjednodušují vyhodnocování jednotlivých úloh, místo mnoha parametrů – intenzity přítoku, vlastností použitých ingrediencí, rozměrů modelové sestavy, frekvence periodických jevů – se porovnávají pouze dvě „čísla“. Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle je v grafech č.10 a 11.

Na obrázku č.53 je porovnán detailní snímek realizované vizualizace s vizualizací provedenou jiným autorem, obojí pro $Re=2 \cdot 10^4$, resp. a) $Re=2296$, b) $Re=2000$.

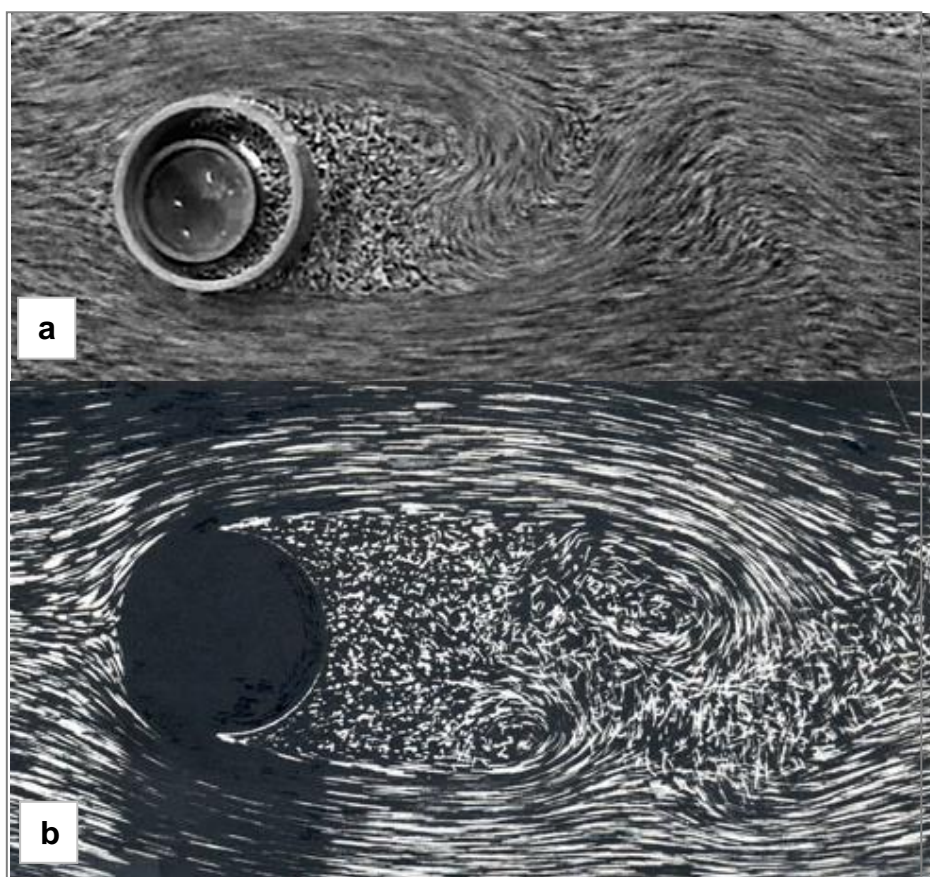
Na obrázku č.54 jsou porovnány výsledky numericvké simulace s vizualizací, a to pro dva různé průměry obtékaného válce a různé rychlosti proudění.



Graf 10 Závislost Strouhalova čísla Sh na Reynoldsově čísle Re pro válec o průměru 32 mm

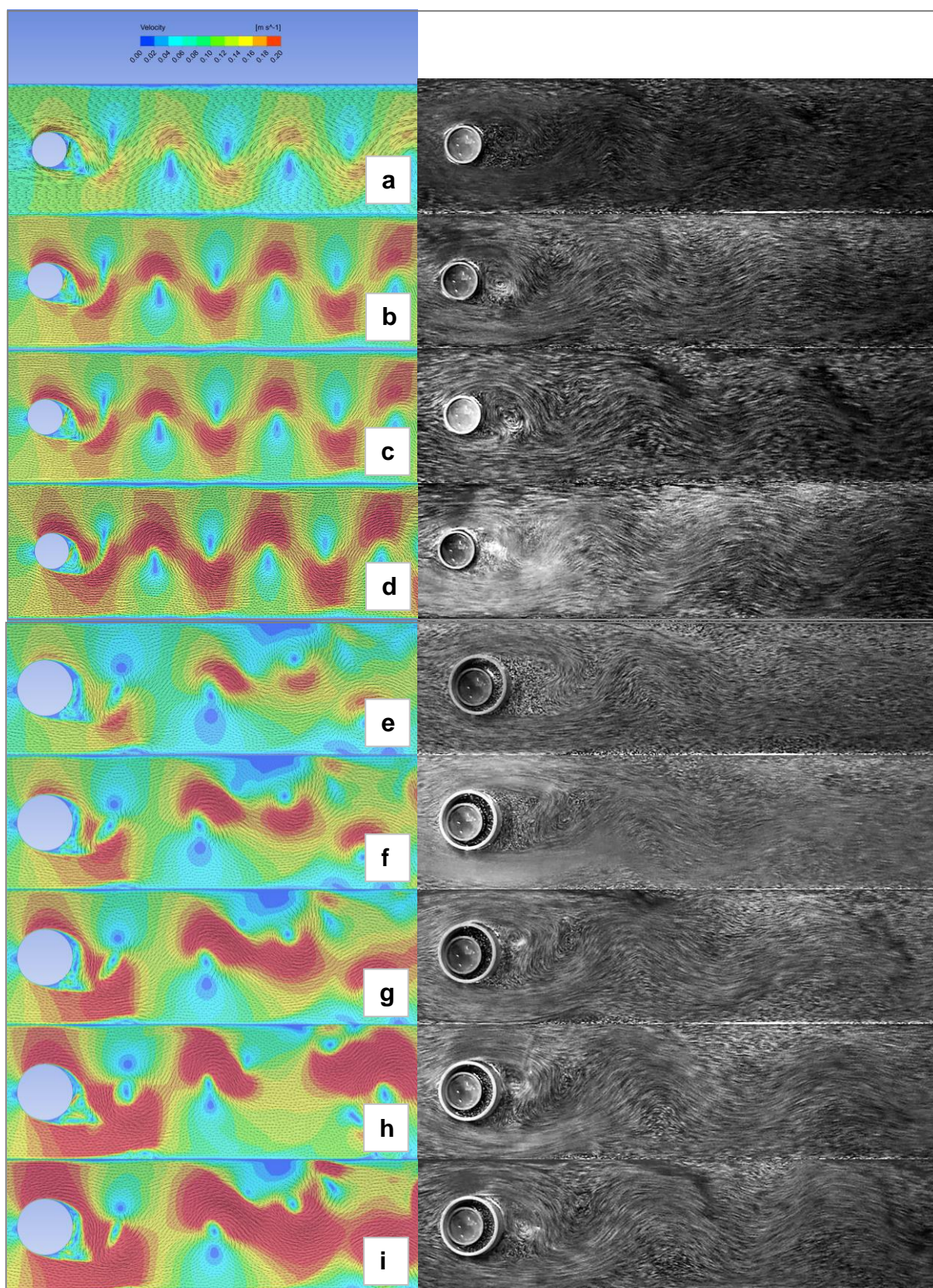


Graf 11 Závislost Strouhalova čísla Sh na Reynoldsově čísle Re pro válec o průměru 50 mm



Obr. 53 Vizualizace obtékání válce

a) realizovaná vizualizace, $Re=2296$, b) vizualizace $Re=2000$ – [41].



Obr. 54 Porovnání fotografií vizualizace proudového pole a obrázků numerické simulace obtékání válce o průměru 0,032 m a 0,050 m

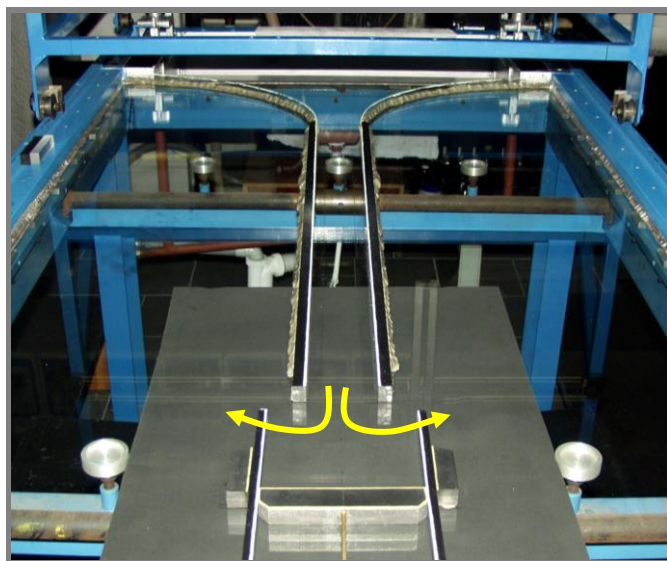
Obrázky a-d jsou pro válec 0,032 m, e-f pro válec 0,050 m.

Rychlosti proudění: a) $0,087 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $0,100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c) $0,113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d) $0,124 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e) $0,072 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, f) $0,087 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, g) $0,100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, h) $0,113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, i) $0,124 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Výsledky numerické simulace ukázaly na shodu s experimentem zejména v oblastech blízko modelu. Ve vzdálenějších oblastech však lze v některých místech pozorovat odlišnosti. To však nevadí, protože v této fázi experimentování šlo jen o ověření správné metodiky vizualizace nikoli o simulace rozsáhlých geometrií. Pokud by měly být simulace provedeny „dokonale“, byly by vyšší nároky na výpočetní techniku a na délku výpočetního času. Video pro obtékání válců o průměrech $d=32$ mm a $d=50$ mm jsou na přiloženém DVD.

6.3 Plnění symetrické dutiny proudem tekutiny

Kanálem konstantního průřezu teče konstantní objemový tok vody a plní souose umístěnou dutinu konstantní šířky, orientovanou proti přítoku a umístěnou v určité vzdálenosti od ústí přítoku. Jakmile se dutina naplní, přitékající proud se symetricky rozdělí do stran a voda odtéká mezerou mezi ústím přítoku a dutinou – viz obrázek č.55.



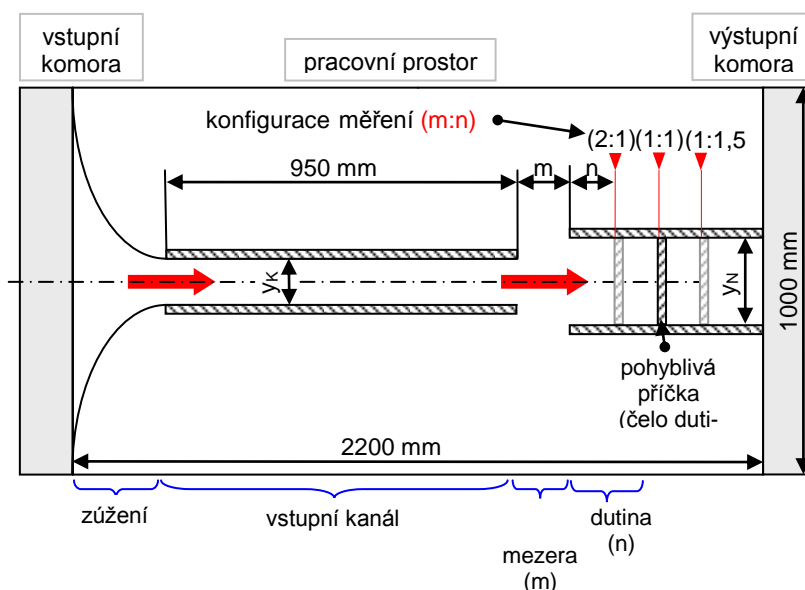
Obr. 55 Modelová sestava – plnění symetrické dutiny

Uvedený mechanismus proudění vody modelovou sestavou nemá trvalý charakter – ve většině případů dojde po určité době k odklonění proudu přítoku mimo osu modelové sestavy a voda odtéká jen jednou stranou – viz obrázek č.60. Vzniklá nesymetrie se projevuje lokálními změnami výšky hladiny uvnitř dutiny. Změna výšky hladiny má podle hydrodynamické analogie, popsané v kapitole 2.1, přímou souvislost se změnou tlaku. Normální výška hladiny²⁵ odpovídá barometrickému tlaku, pokles hladiny znamená podtlak, vzduší hladiny naznačuje přetlak. Asymetricky odkloněný proud k sobě přisává obsah dutiny, hladina uvnitř se snižuje a tlaková difference roste. Vzniklý podtlak působí na proud, který se nasměruje zpět do dutiny. Proud vody se může vrátit zpět do původního „osového směru“, ale ve většině případů se to nestane. Vlivem setrvačnosti proud pokračuje přes osu symetrie a odkloní se na opačnou stranu. Proces odklánění proudu do stran má periodický charakter, počáteční nepravidelnost relativně rychle mizí a frekvence změn se stabilizuje. Tímto způsobem se dutina plní a vyprazdňuje – cyklus změn je „plnění + vyprázdnění vlevo a plnění + vyprázdnění vpravo“.

Cílem experimentu „plnění symetrické dutiny proudem tekutiny“ byla identifikace periodických jevů, projevujících se změnami lokálních výšek hladiny v modelové sestavě. Uvedené jevy ovlivňuje řada faktorů, z nichž ty nejvýznamnější lze sdružit do dvou skupin. První

²⁵ Normální výškou je myšlena výška hladiny, nastavená hradítky na odtoku a kontrolně měřená v místě, kde je hladina nejklidnější – v ideálním případě by neměla pulsovat vůbec, ale experiment je omezen rozměry analogového zařízení. Oblast nejklidnější hladiny se vyskytuje na rozhraní pracovního prostoru (skleněné desky) a výstupní komory.

skupinu faktorů tvoří geometrické parametry modelové sestavy, tj. rozměry jednotlivých částí a poloha vzhledem k přítoku, druhou skupinu tvoří parametry, charakterizující intenzitu proudu, vstupujícího do modelové sestavy, tj. průtočné množství a rozměry trysky (ústí přítokového kanálu). Schéma modelové sestavy je na obrázku č.56.



Obr. 56 Schéma experimentu plnění symetrické dutiny

m je vzdálenost nádoby od ústí přítokového kanálu – mezera, kterou se vyprazdňuje dutina,

n je délka dutiny, y_K je šířka přítokového kanálu, y_N je šířka dutiny, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny.

6.3.1 Parametry pro experiment – symetrická dutina

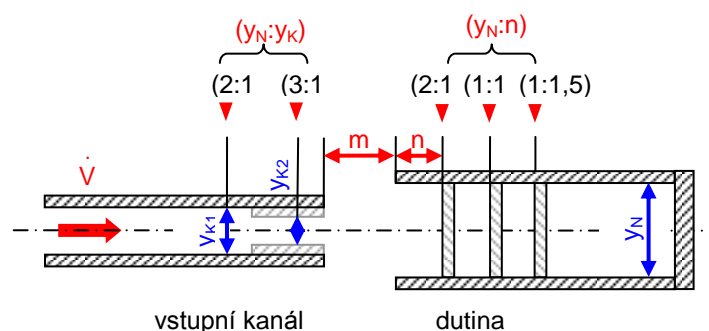
Experimentem byla zjišťována závislosti frekvence samovolného vyprazdňování nádoby na poměru šířky nádoby vůči šířce přítokového kanálu ($y_N : y_K$), na poměru šířky dutiny vůči její délce ($y_N : n$), na vzdálenosti m přítokového kanálu od dutiny a na střední rychlosti vody na přítoku, určené z konstantního objemového toku \dot{V} . Schéma uspořádání je na obrázku č.27.

Zvolené konstantní hodnoty:

- $y_N = 160 \text{ mm}$... šířka dutiny,
- $\dot{V} = 800 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$... objemový tok.

Zvolené rozsahy proměnných:

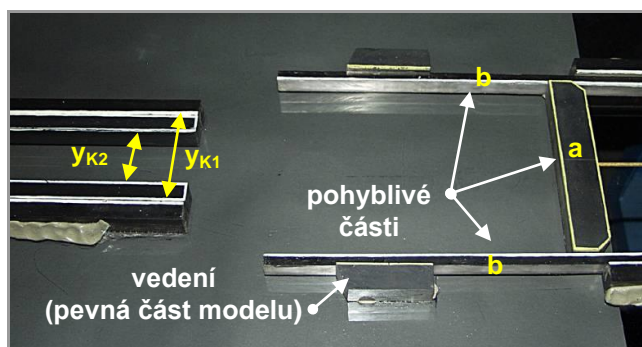
- $(y_N : y_K)[-]$... poměr šířky dutiny a šířky přítokového kanálu ... (2:1), (3:1),
- $(y_N : n)[-]$... poměr šířky a délky dutiny... (2:1), (1:1),
- $m[\text{cm}]$... vzdálenost dutiny od ústí přítokového kanálu... 70, 100, 120, 140.



Obr. 57 Konstanty a proměnné – symetrická dutina

Konstanty: y_N je šířka dutiny, \dot{V} je objemový tok. Proměnné: y_{K1} , y_{K2} jsou šířky vstupního kanálu, m je vzdálenost dutiny od ústí přítokového kanálu – mezera, kterou dochází k vyprazdňování dutiny, n je délka dutiny, $(y_N:y_K)$ je poměr šířky dutiny a šířky přítokového kanálu, $(y_N:n)$ je poměr šířky a délky dutiny.

Model byl vyroben z plexisklových profilů, které byly jednotlivě přišroubovány na tenkou plexisklovou desku. Poté byla celá deska s modelovou sestavou připevněna na skleněnou pracovní plochu hydrodynamické vany. Tímto opatřením byla zajištěna souosost přítoku a dutiny²⁶. Modelová sestava je tvořena vedením, které umožňuje měnit vzdálenost nádoby od ústí kanálu, vloženou příčkou lze regulovat délku dutiny. Dvě varianty šířky přítoku lze upravovat vložím plexisklových profilů – viz obrázek č.58.



Obr. 58 Variabilita modelové sestavy symetrické dutiny

Vkládáním hranolů lze měnit šířku přítokového kanálu y_{K1} , y_{K2} , délka nádoby se reguluje posunem pohyblivé části a, lze měnit i vzdálenost nádoby od přítoku posunutím částí b.

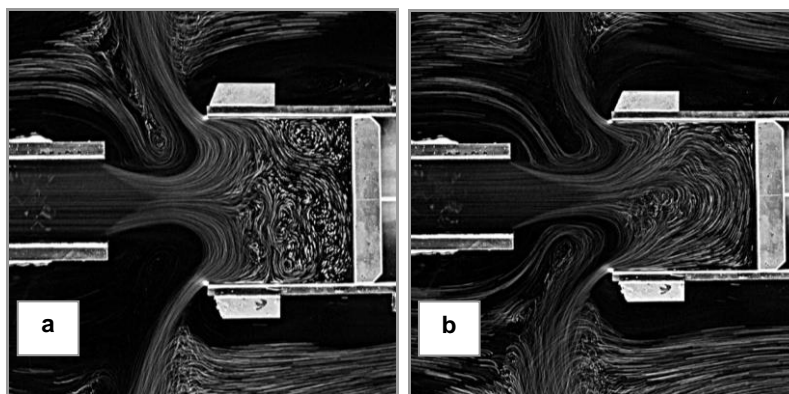
6.3.2 Realizace experimentu a získané výsledky – symetrická dutina

Experiment byl proveden dvěma metodami, metodou vizualizace hliníkovým prachem – viz obrázky č.59, Obr. 60, 61 a nitěnými sondami na obrázcích č.63 a 64.

Začátek plnění dutiny poskytl téměř symetrický obraz, jak ukazuje obrázek č.59a, poté začala velmi pozvolná, ale viditelná změna. Proud se začal odklánět k jedné straně dutiny

²⁶ První experimenty, realizované na modelové sestavě, tvořené několika díly, jednotlivě připevněnými na sklo tmelem, musely být anulovány. Některé z nich se totiž během experimentu „neviditelně“ posunuly po skle, tím se porušila symetrie modelu, původně pravidelně se odklánějící proud se ustálil na jedné straně a vše teklo pouze tam. Miniaturní pohyb části modelu byl okem nepostřehnutelný a byl zjištěn úchylkoměrem.

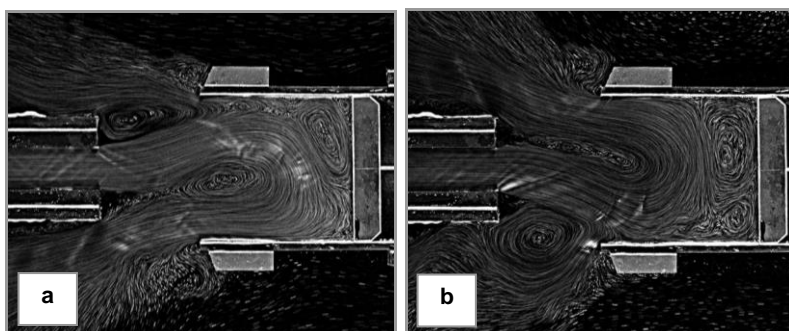
a její obsah začal vytékat druhou stranou – viz obrázek č.59b. Po určitém čase se směr odklonu převrátil na opačnou stranu a celý proces se začal pravidelně opakovat. Střední rychlost vody odpovídala hodnotě $w_1 = 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 59 Vizualizace hliníkovým prachem – plnění symetrické nádoby 1

$y_{K1} = 80 \text{ mm}$, $(y_N : n) = (1:1)$, $(y_N : y_K) = (2:1)$, $w_1 = 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a) symetrický obraz proudění vody v nádobě, b) vznikající asymetrie proudění vody, y_{K1} je šířka přítokového kanálu, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny, $(y_N : y_K)$ je poměr šířky dutiny a šířky přítokového kanálu, $w_1 \dots$ rychlost vody v přítokovém kanále. Expoziční doba je 1s.

Následující snímky na obrázku č.60 zobrazují situaci po zúžení přítokového kanálu dle poměru $(y_N : y_K) = (1:3)$. Při zachování stejného objemového průtoku vody se střední rychlost na přítoku zvýšila na $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Poměr šířky a délky nádoby byl ponechán $(1:1)$, stejně tak i vzdálenost dutiny od ústí přítoku. Při plnění dutiny se proud odkláněl od osy symetrie střídavě do stran. Zvýšení rychlosti se projevilo rychlejšími odklony proudu do stran, důkladnějším promícháváním obsahu dutiny. Tím byla zajištěna (na rozdíl od experimentu při nižší rychlosti) pravidelnější výměna celého obsahu dutiny.

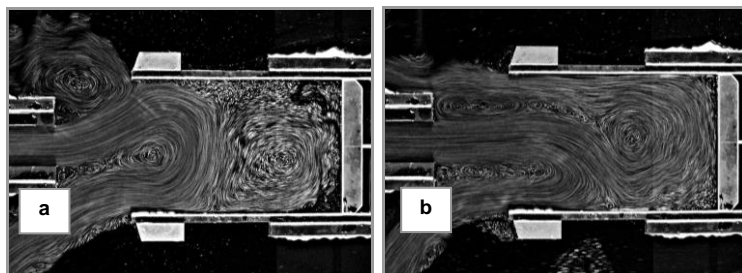


Obr. 60 Vizualizace hliníkovým prachem – plnění symetrické nádoby 2

$y_{K2} = 45 \text{ mm}$, $(y_N : n) = (1:1)$, $(y_N : y_K) = (3:1)$, $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a) obraz proudění vody v nádobě při odkloněném proudu, b) změna směru odklonu proudu, y_{K2} je šířka přítokového kanálu, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny, $(y_N : y_K)$ je poměr šířky dutiny k šířce přítokového kanálu, w_2 rychlost vody v přítokovém kanále. Expoziční doba je 0,5s.

Experiment, jehož ukázka je zde uvedena jako poslední – viz obrázek č.61 – byl proveden za stejných podmínek jako předcházející případy, změněn byl pouze poměr šířky a délky dutiny, a to $(y_N : y_K) = (1:1,5)$. J vidět, že nedochází k pravidelnému vyprazdňování

celého obsahu. Vizualizační částice vykazují minimální pohyb, to odpovídá intenzitě „pohybu“ vody. Velký vír uprostřed způsobuje, že se voda „dočasně“ nedostává ven z dutiny.



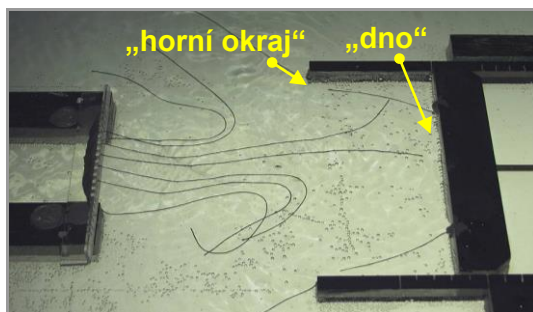
Obr. 61 Vizualizace hliníkovým prachem – plnění symetrické nádoby 3

$y_{K2} = 45 \text{ mm}$, $(y_N : n) = (1 : 1,5)$, $(y_N : y_K) = (3 : 1)$, $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a) nepatrný pohyb vody je zviditelněn vizualizačními částicemi, které se jeví jako tečky nebo velmi krátké čárky, b) k vyprázdnění celého obsahu dutiny nedochází pravidelně, y_{K2} je šířka přítokového kanálu, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny, $(y_N : y_K)$ je poměr šířky dutiny k šířce přítokového kanálu, $w_2 \dots$ rychlost vody v přítokovém kanále. Expoziční doba je 0,5s.

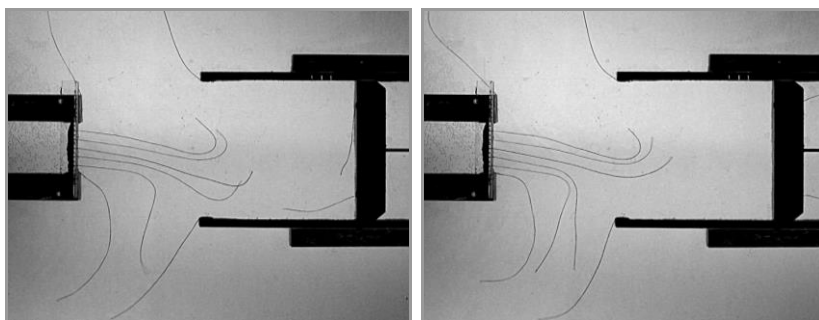
Pro zjištění frekvence odklání proudů (a s tím související vyprazdňování dutiny) byla použita metoda nitěných sond. Experiment byl proveden pro varianty geometrií $(y_N : n) = (2 : 1), (1 : 1), (1 : 1,5)$. Nitěné sondy (7 ks) byly umístěny do ústí přítoku těsně nad hladinu, aby jejich ukotvení nenarušilo průtok vody. Další sondy byly přilepeny v úrovni hladiny tmelem, a to na „dno“ nádoby (2ks) a na „horní okraj“ nádoby (2ks) – viz obrázek č.62. Střední sonda na přítoku měla důležitou roli při stanovování frekvence změn směru proudění, ostatní sondy sloužily ke kontrole proudění. Na základě pozorování pohybu střední nitě a změřením doby trvání deseti odklonů byla vypočtena frekvence odklonů proudů, tato frekvence odpovídá frekvenci vyprazdňování dutiny. Měření doby trvání deseti odklonů bylo opakováno pro každý případ dvanáctkrát, dvě extrémní hodnoty byly z měření vyřazeny.

Metoda nitěných sond je extrémně náročná na dodržení rychlosti proudění, tj. na konstantní průtok vody. Při změně tlaku ve vodovodní síti bylo nutno měření opakovat.

Z měření vyplynulo, že k nejpravidelnějšímu vyprazdňování celého obsahu nádoby dochází při vzdálenosti nádoby od ústí přítoku $m = 120 \text{ mm}$, střední rychlosti proudů v ústí přítokového kanálu $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a geometrií nádoby $(y_N : n) = (1 : 1)$.

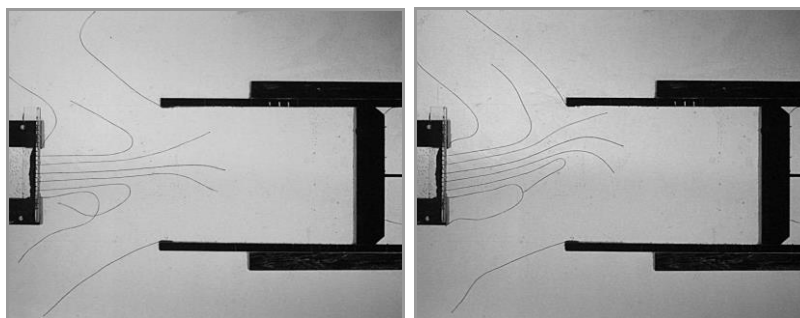


Obr. 62 Poloha nitěných sond na modelové sestavě



Obr. 63 Vizualizace nitěnými sondami – plnění symetrické nádoby 1

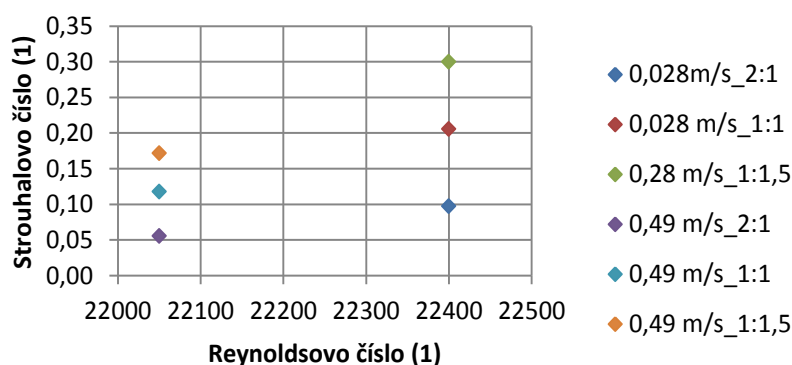
$(y_N : y_K) = (3 : 1)$, $(y_N : n) = (1 : 1)$, $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $(y_N : y_K)$ je poměr šířky dutiny a šířky přítokového kanálu, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny, w_2 je rychlost vody v přítokovém kanále.



Obr. 64 Vizualizace nitěnými sondami – plnění symetrické nádoby 2

$(y_N : y_K) = (3 : 1)$, $(y_N : n) = (1 : 1,5)$, $w_2 = 0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $(y_N : y_K)$ je poměr šířky dutiny a šířky přítokového kanálu, $(y_N : n)$ je poměr šířky a délky dutiny, w_2 je rychlost vody v přítokovém kanále.

V grafu č.12 je závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově číslu. Reynoldsovo číslo bylo vypočteno z rovnice kontinuity (6.2), do níž byla dosazena rychlost proudění (změřená rotametrem) a šířka přítoku. Charakteristickým rozměrem pro výpočet Strouhalova čísla byla délka dutiny. Pokračování experimentu bylo zrušeno kvůli nadměrné náročnosti při dodržování velmi přesné geometrie modelové sestavy: při každé změně geometrie musela deska s přišroubovanými modely odstraněna z hydrodynamické vany, poté byla přeměřena souosost a deska byla znovu osazena do pracovního prosoru. Přesto, že v tomto experimentu nebylo pokračováno, mohou být výsledky významné při porovnávání s podobnými experimenty.

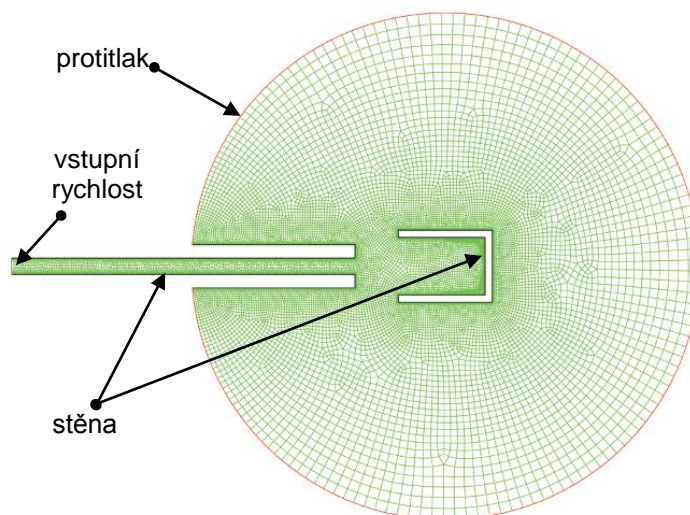


Graf 12 Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově číslu pro symetrickou dutinu

Měření bylo provedeno pro dvě rychlosti proudění: $0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.3.3 Numerická simulace – symetrická dutina

Případ plnění symetrické dutiny byl simulován v programu Fluent 6.3. Pro numerickou simulaci byla zvolena varianta s poměrem šířky a hloubky dutiny $(y_N : n) = (1 : 1,5)$. Sít' modulu byla vytvořena v preprocesoru GAMBIT. Byla použita kombinace čtyřúhelníkových a trojúhelníkových elementů. Výsledná sít' má 27000 elementů a je na obrázku č.65.

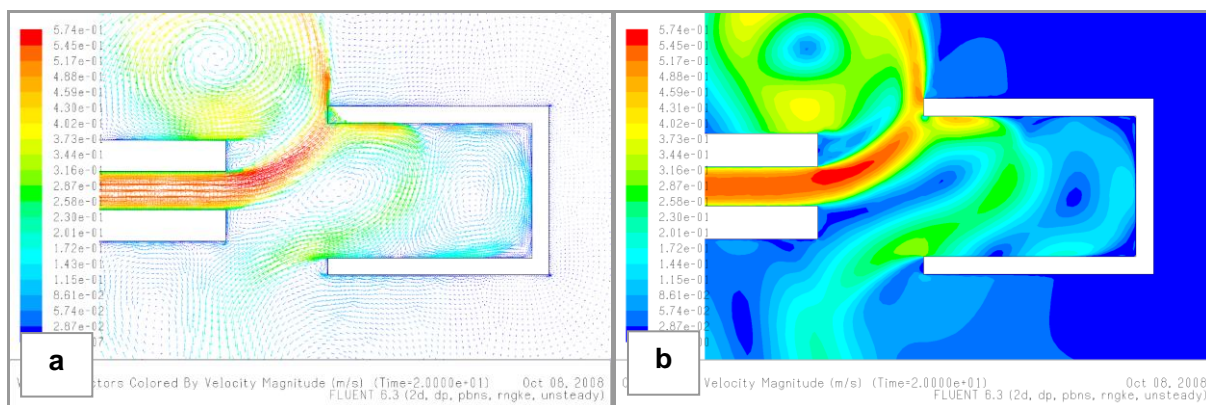


Obr. 65 Vygenerovaná sít' programem GAMBIT

Pro simulaci byl vybrán nestacionární vazký nestlačitelný k- ϵ model v modifikaci RNG. Pro vstup byla zadána rychlost pomocí okrajové podmínky „velocity-inlet“ na hodnotu $0,49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výstupní okrajová podmínka byla nastavena na podmínku „pressure-outlet“. Na stěny byla aplikována okrajová podmínka „Wall“. Jako časový krok byla zvolena hodnota $0,02 \text{ s}$. Pro jeden časový krok byl definován maximální počet iterací – 50. Během výpočtu bylo zjištěno, že pro jeden časový krok by stačila hodnota 30. Podmínka konvergence byla u všech sledovaných veličin nastavena na 10^{-6} . Na obrázcích č.66a a 66b jsou výsledky numerické simulace, odpovídající vizualizaci na obrázcích č.61a, na obrázcích č.67a a 67b je numerická simulace, odpovídající vizualizaci na obrázku č.61b.

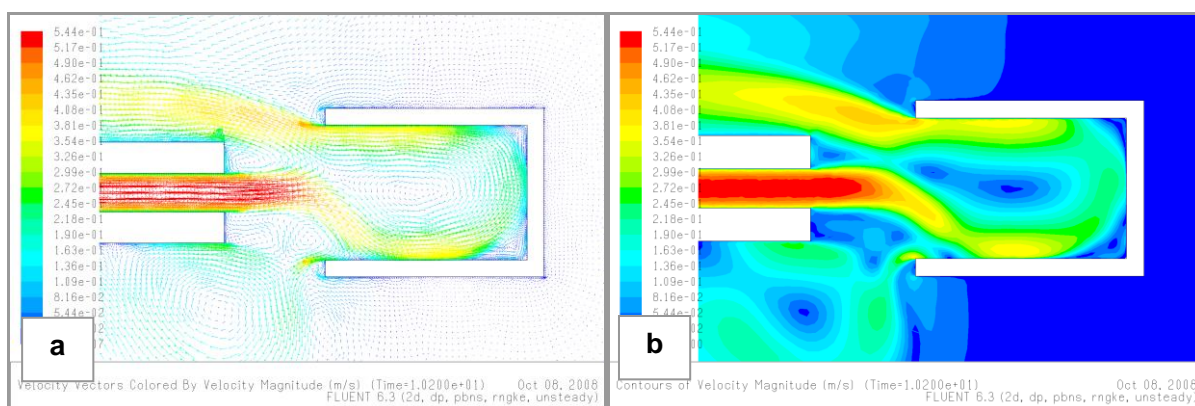
Provedené experimenty s plněním a vyprazdňováním symetrické dutiny byly extrémně náročné na preciznost přípravy a důslednou kontrolu průběhu měření – zejména práce s nitěnými sondami je toho dokladem. Jednalo se o časově náročnou činnost, při níž byl získán velký objem záznamů, ty musely být seříděny a některé vyřazeny kvůli dodatečně zjištěné chybě. Během měření nelze kvůli načasování některých měření vykonávat kontrolní činnosti. Extrémní vybočení v jedné z několika sérií měření je považováno za chybu, proto jsou získané údaje z dalšího vyhodnocování vyřazeny. Po zpracování experimentů bylo přistoupeno ke konfrontaci s numerickými simulacemi, které se ve velké míře shodovaly s odpovídajícími vizualizacemi hliníkovým prachem. Vybrané experimenty a numerické simulace byly uplatněny ve vlastních publikacích – [A16] a [A17].

Při numerické simulaci se zjistilo, že při dokonalých podmínkách se proud neodkloní. Aby vznikly pulsace, bylo třeba zadat do systému malý rozruch, poté běžel proces již samovolně. Při experimentu nebylo třeba žádný impuls uměle vyvolávat, jevy vznikly samovolně v důsledku neodstranitelných nepřesností: miniaturních výkyvů průtočného množství a drobných nepřesností v geometrii sestavy.



Obr. 66 Proudění v dutině ($y_N : n$) = (1:1,5) při střední rychlosti přítoku 0,49 m/s

a) vektorové pole, b) kontury rychlosti.



Obr. 67 Proudění v dutině ($y_N : n$) = (1:1,5) při střední rychlosti přítoku 0,49 m/s

a) vektorové pole, b) kontury rychlosti.

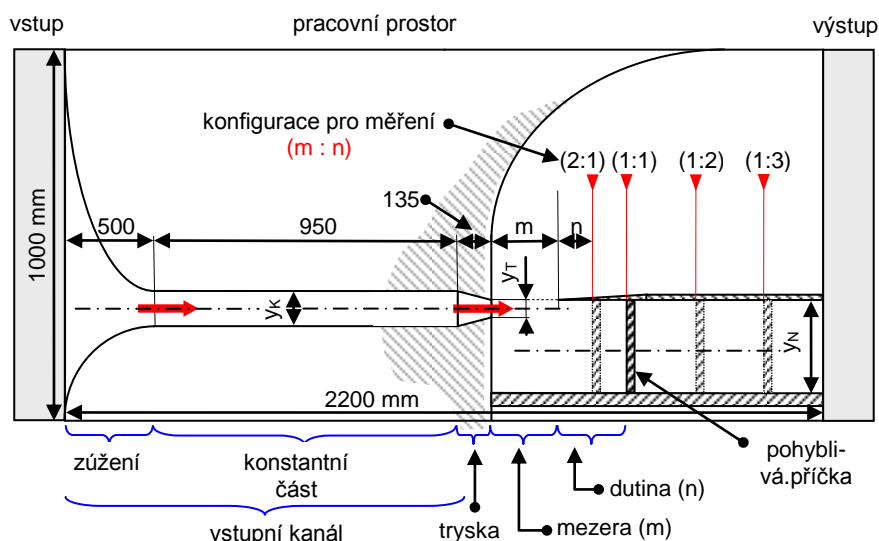
6.4 Plnění nesymetrické dutiny proudem tekutiny

Experiment plnění nesymetrické dutiny je další úlohou, zajímavou pro pozorování a identifikaci samobuzených nestacionarit, generovaných stacionárním vstupem a je „hlavním experimentem“ této práce. Po zkušenostech s plněním symetrické dutiny proudem vody, byl připraven experiment s plněním dutiny, umístěné proti osově posunutému přítokovému kanálu. Jedna strana dutiny byla vytvarována do tzv. ostré hrany, druhá strana dutiny byla prodloužena a dutinu jednostranně uzavřela. Díky této úpravě nedochází k nežádoucímu úniku vody a projevy očekávaných jevů nejsou zeslabeny. Touto úpravou se z původně symetrické dutiny stala dutina nesymetrická – schéma je na obrázku č.68. Přítokový kanál je zakončen tryskou – proud vody je koncentrován do „paprsku“ o vyšší rychlosti a intenzivněji směřován do dutiny. To je důležité při větších vzdálenostech dutiny od ústí přítoku, kdy by se pomalý a široký proud vody mohl rozplynout již v prostoru před dutinou.

Během tohoto experimentu byla realizována myšlenka identifikace frekvence pulsačních jevů a proměrování lokálních výšek hladiny – byl dokončen vývoj a konstrukce měřícího zařízení – „Snímače výšky hladiny a frekvence kmitání hladiny“ – kterým lze měřit snadněji a přesněji. Úroveň stanovení frekvencí se posunula od sledování nitěných sond se stopkami v ruce ke snímání vlasovou redukcí měřící sondy s akustickou a grafickou jednotkou. Měření lokálních výšek mikrometrickým šroubem se zpřesnilo použitím digitálního snímače výšky hladiny s upraveným hrotem měřící sondy.

Modelová sestava, do níž je tryskou, umístěnou proti ostré hraně dutiny s měnitelnou délkou, vháněna tekutina, připomíná píšťalu, zmíněnou v úvodu této práce. Podobnost rozkmitaného vzduchu v píšťale a vody uvnitř modelové sestavy není náhodná. Výška tónu (a tedy i frekvence kmitání) se mění v závislosti na délce dutiny – v hudebním nástroji je simulována zakrýváním a odkrýváním otvorů, v modelové sestavě změnou délky dutiny. Konstantní šířka dutiny a trysky přítoku do modelové sestavy reprezentuje „volbu konkrétního nástroje“, průtočné množství vody „sílu dechu hráče na nástroj“.

Cílem experimentu „plnění nesymetrické dutiny proudem tekutiny“ byla identifikace periodicit, ovlivněných geometrií modelové sestavy a intenzitou přítoku. Model byl vyroben z plexisklových profilů a upevněn tmelem přímo na skleněnou pracovní plochu hydrodynamické vany. Schéma modelové sestavy je na obrázku č.68.

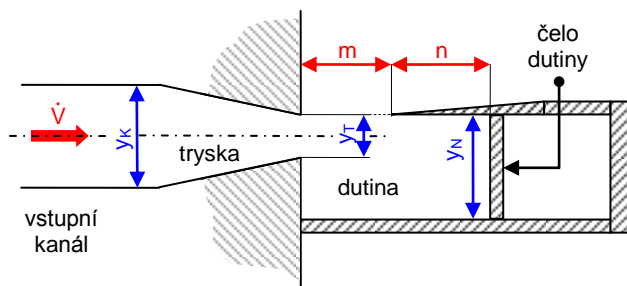


Obr. 68 Schéma experimentu plnění nesymetrické dutiny proudem tekutiny

m je vzdálenost nádoby od ústí přítokového kanálu – mezera, kterou dochází k vyprazdňování dutiny, n je délka dutiny, y_k je šířka přítokového kanálu, y_T je šířka trysky na konci přítokového kanálu, y_N je šířka dutiny, $(m:n)$ je poměr mezery a délky dutiny.

6.4.1 Parametry pro experiment a měření – nesymetrická dutina

Experiment byl realizován pro několik variant modelové sestavy dle obrázku č.69 a pro různá průtočná množství (rychlost proudění) vody na přítoku.

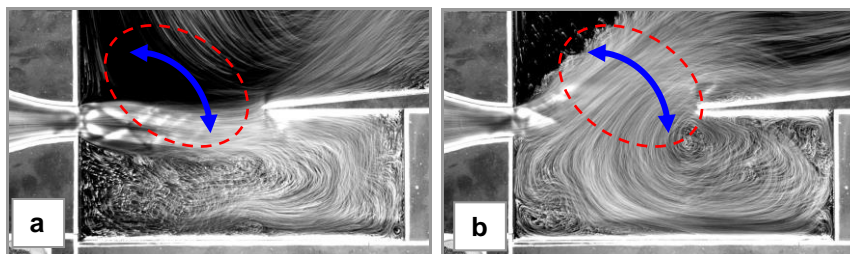


Obr. 69 Konstanty a proměnné – nesymetrická dutina

Konstanty: y_k je šířka přítokového kanálu, y_T je šířka trysky na konci přítokového kanálu, y_N je šířka dutiny. Proměnné: m je velikost mezery, sloužící k vyprazdňování dutiny, n je délka dutiny, \dot{V} je objemový tok. Tryska je znázorněna schematicky, ve skutečnosti je tvarovaná.

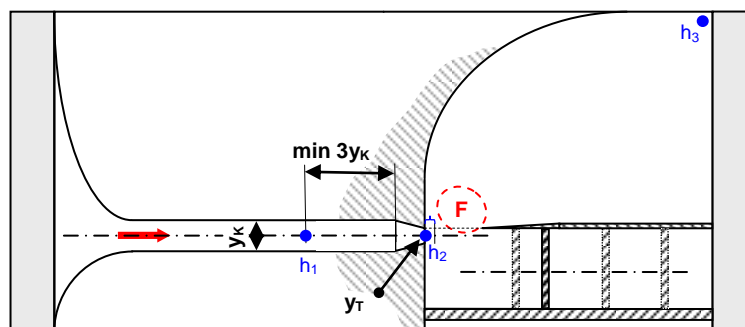
Jako konstanty byly zvoleny rozměry modelu (částí modelové sestavy) ve směru osy y , tj. rozměry kolmé ke směru proudění, jako proměnné byly určeny rozměry ve směru proudění, tj. ve směru osy x (poměr vzdálenosti dutiny a délky dutiny $m:n$).

Výběr míst, vhodných pro měření frekvenčních jevů a výšek hladiny byl proveden na základě pozorování odklánění proudu (při vizualizace) – viz obrázek č.70. Místa, v nichž byla měřena výška hladiny frekvence pulsací, jsou na obrázku č.71.



Obr. 70 Oblast měření frekvence odklánění proudu

a) proud vody směřuje do dutiny – dutina se plní, b) proud vody směřuje ven – nádoba se vyprázdňuje. Odklánění proudu – modrá šipka, oblast pro měření – červeně.



Obr. 71 Poloha měřicích míst pro měření výšek hladiny a frekvencí odklánění proudu vody

h_1, h_2, h_2 jsou místa pro měření výšky hladiny vody, F je oblast pro měření frekvencí.

Parametry pro experiment a měření – konstanty

- $y_K = 86 \text{ mm}$... šířka přítokového kanálu,
- $y_T = 20 \text{ mm}$... šířka trysky,
- $y_N = 92 \text{ mm}$... šířka dutiny.

Parametry pro experiment a měření – proměnné

- $m(\text{cm})$... vzdálenost dutiny od ústí přítokového kanálu 6, 7, 8, 10, 12, 14,
- $n(\text{cm})$... délka dutiny některé hodnoty rozměru n byly zvoleny mimo níže uvedené poměry ($m:n$), a to podle konkrétních potřeb experimentu (například zpřesnění průběhu v případě skokových změn),
- $(m:n)(1)$... poměr vzdálenost dutiny od ústí trysky a délky dutiny... (1:0,5), (1:1), (1:2), (1:3), (1:4),
- $\dot{V}(\text{l} \cdot \text{h}^{-1})$... objemový tok... 100, 200, 300, 100, 400, 500.

Parametry pro experiment a měření – měřicí místa – viz obrázek č.71

- h_1 ... bod pro měření výšky hladiny v přítokovém kanále,
- h_2 ... bod pro měření výšky hladiny v trysce,
- h_3 ... místo pro měření výšky hladiny „daleko“ od modelové sestavy, v místě, kde je klidná hladina (anebo nejklidnější možná v rámci rozměru analogového zařízení),
- F ... oblast pro měření frekvence odklápění proudu

6.4.2 Realizace experimentu a získané výsledky – nesymetrická dutina

Při experimentu bylo sledováno samovolné vyprazdňování a plnění nesymetrické dutiny, vznik a vývoj pulsací od jednotlivých nepravidelných jevů až po jevy periodicky se opakující. Účelem experimentu bylo nalezení podmínek pro vznik a udržení periodických jevů v závislosti na intenzitě přítoku vody a na zvolených proměnných. Byly měřeny výšky hladiny a frekvence periodických pulsací.

Kromě závislosti Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle byly sestaveny další grafické závislosti, které mají význam pouze pro tento konkrétní experiment. Dávají do souvislosti naměřené hodnoty s rozměry dané modelové sestavy, tedy s parametry, u jiných úloh neexistujícími. Jedná se o vzdálenosti modelové sestavy od trysky přítoku – mezeru m , délku dutiny n , eventuálně o jejich součet – vzdálenost čela dutiny od ústí trysky přítoku ($m + n$).

Měřené veličiny – viz obrázek č.71

- $h_K(m)$... výška hladiny v přítokovém kanále, měřeno v místě h_1 ,
- $h_T(m)$... výška hladiny v trysce, měřeno v místě h_2 ,
- $h_A(m)$... výška hladiny daleko od modelové sestavy, v místě, kde je hladina klidná, měřeno v místě h_3 ,
- $f_M(\text{Hz})$... frekvence odklápění proudu z trysky resp. frekvence plnění a vyprázdnění dutiny.

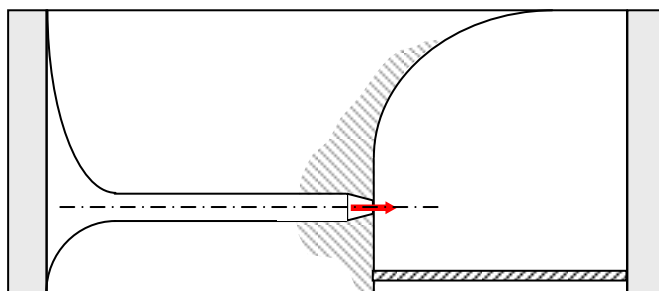
Dopočítané hodnoty

- $w_K, w_T(m \cdot s^{-1})$... rychlost proudění vody v přítokovém kanále, v trysce – počítáno jako střední rychlost z rovnice kontinuity (6.2),
- $Re(1)$... Reynoldsovo číslo – počítáno ze střední rychlosti proudění v trysce w_T , pro charakteristický rozměr $d_U = y_T$ a kinematickou viskozitu ν – rovnice v poznámce pod čarou na straně 26,

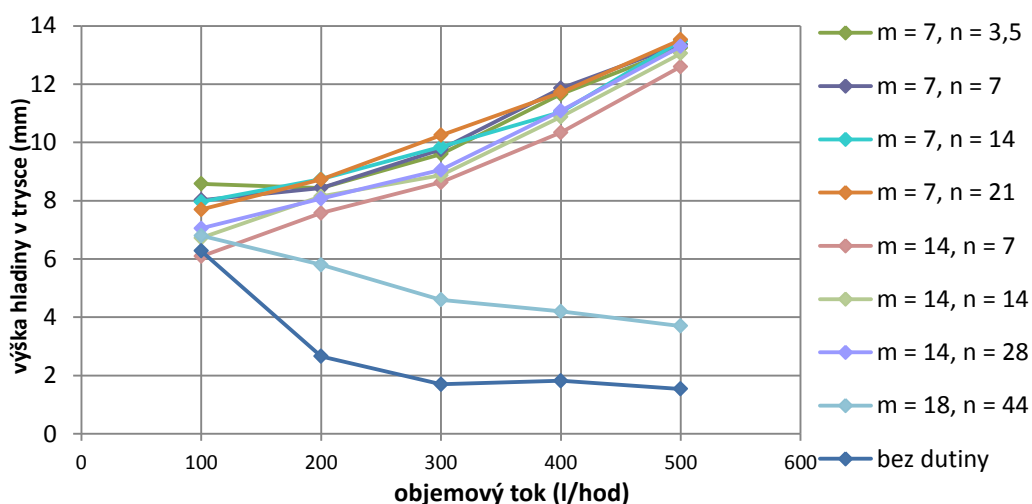
- $Sh(1)$... Strouhalovo číslo – počítáno ze střední rychlosti proudění v trysce w_T , změřené frekvence f a charakteristického rozměru d_U ²⁷ – rovnice v poznámce pod čarou na straně 17.
- f_D (Hz) ... frekvence kmitání vzduchu – vypočteno z frekvencí f_M , naměřených na modelu pro rovnost Strouhalových a Machových čísel ($Sh_M = Sh_D$, $Ma_M = Ma_D$) – Machovo číslo – rovnice v poznámce pod čarou na straně 19.

Největším problémem při experimentu bylo stanovení rychlosti proudění v trysce, protože tato rychlost je ovlivňována pulsacemi uvnitř dutiny. V úvodu kapitoly o experimentech jsou zmíněny dvě varianty přístupu pro výpočet rychlosti – trojrozměrný a dvojrozměrný, a také bylo kontrolně měřeno metodou CTA.

Ve 3D výpočtech rychlosti je třeba znát výšku hladiny a objemový tok. Graf č. ukazuje, že výška hladiny pro zvolené geometrické sestavy závisí přímo úměrně na objemovém toku a s růstem hodnoty $(m+n)$ také roste. Právým opakem je případ „bez dutiny“ viz obrázek č.Obr. 72, a také „maxirozměry“ $(m+n) = (18+44)$. V těchto případech hladina klesá.



Obr. 72 Měření výšky hladiny bez modelové sestavy



Graf 13 Závislost výšky hladiny v ústí trysky h_T na objemovém toku \dot{V}

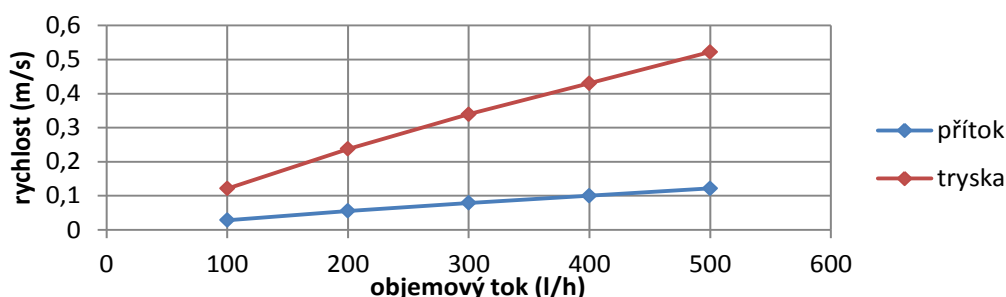
²⁷ Charakteristický rozměr pro výpočet Strouhalova čísla byl uvažován postupně jako vzdálenost ústí trysky od dutiny (m), jako délka dutiny (n) a jako vzdálenost čela nádoby od ústí přítoku ($m+n$).

Z grafu č.13 je vidět, že výška hladiny ve zvolených modelových sestavách závisí výrazně na objemovém toku, zatímco vliv vzdálenosti a délky nádoby je malý. Uvážili-li se, že vstupní proud v trysce vlivem jevů v přilehlé modelové sestavě kmitá, lze zcela jistě tento minimální rozdíl zanedbat.

V experimentech byla dále uvažována rychlost proudění pro dvojrozměrnou úvahu, vypočtená z rovnice kontinuity, kdy výška hladiny pro výpočet průtočného profilu byla stejná v kanále i v trysce. Do této rovnice byl dosazován objemový tok, nastavovaný v celých číslech na přítoku. Z toho důvodu jsou některé grafy konstruovány jako závislost na objemovém toku a rychlosti, odpovídající jednotlivým objemovým tokům jsou uváděny v legendě pod obrázkem. Závislost rychlosti proudění na objemovém toku je v tabulce č.3 Tab. 3 a v grafu č.14.

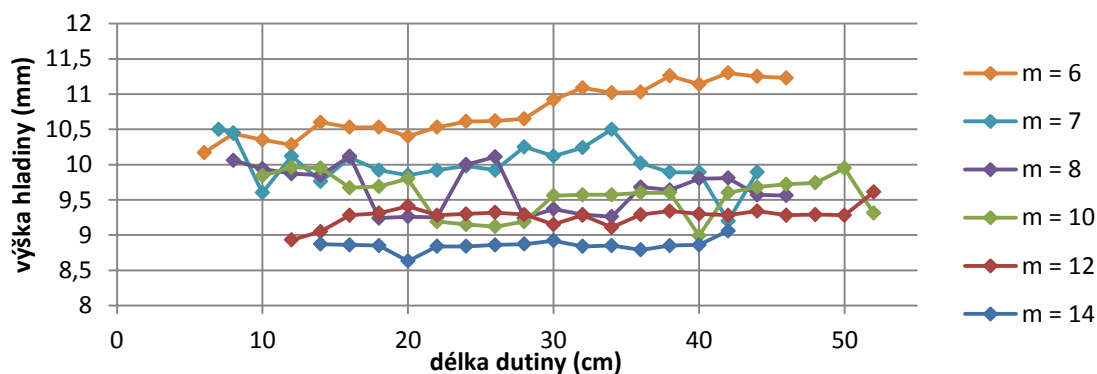
Tab. 3 Rychlost proudění v přítokovém kanále w_K a v trysce w_T v závislosti na objemovém toku \dot{V}

$\dot{V} (l \cdot h^{-1})$	$w_K (m \cdot s^{-1})$	$w_T (m \cdot s^{-1})$
100	0,028	0,121
200	0,055	0,238
300	0,079	0,339
400	0,100	0,430
500	0,121	0,522



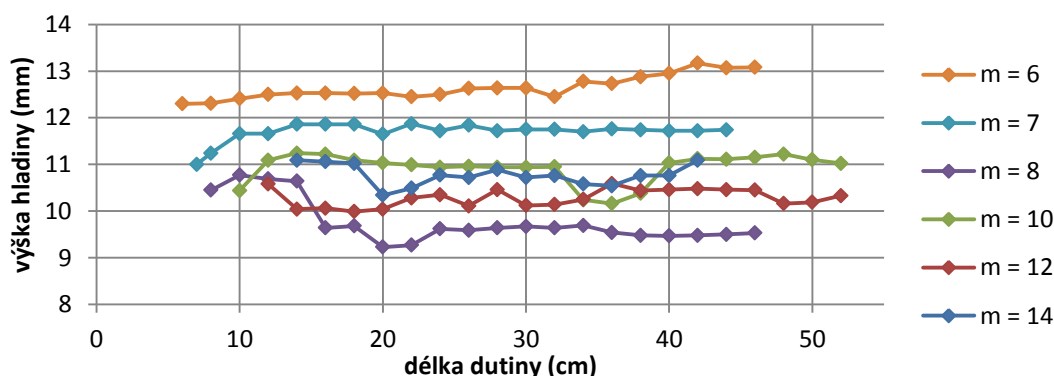
Graf 14 Rychlost v přítokovém kanále w_K a v trysce w_T v závislosti na objemovém toku \dot{V}

Následující grafické závislosti (grafy č.15, 16 a 17) ukazují vliv délky dutiny n a intenzity přítoku (objemovém toku) \dot{V} na výšku hladiny v ústí trysky h_T . Z grafů plyne, že výška hladiny závisí na intenzitě přítoku – při vyšší rychlosti je výška hladiny vyšší, zatímco vliv délky dutiny je malý.



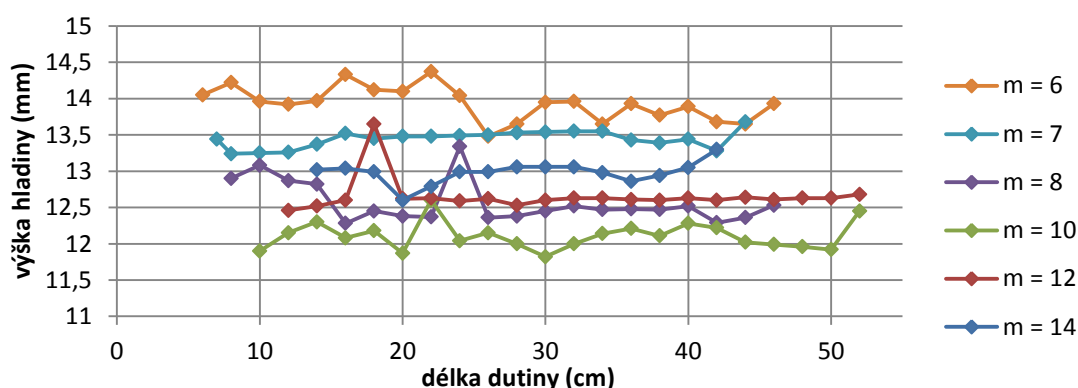
Graf 15 Závislost výšky hladiny h_T v ústí trysky na délce dutiny n pro objemový tok $300 l \cdot h^{-1}$.

Měřeno pro různé mezery m .



Graf 16 Závislost výšky hladiny h_r v ústí trysky na délce dutiny n pro objemový tok $400 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

Měřeno pro různé mezery m .



Graf 17 Závislost výšky hladiny h_r v ústí trysky na délce dutiny n pro objemový tok.

Měřeno pro různé mezery m .

Kromě výšek hladiny, které byly proměřovány z důvodu dopočtu rychlosti, byly měřeny frekvence odklápění proudu. Tato měření vyžadovala trpělivé vyčkávání na dobu, kdy se proud začne odklánět v pravidelných intervalech. Ke snímači frekvencí byl připojen grafický výstup a na příslušném záznamu byly vyhodnoceny oblasti s pravidelnou strukturou „kresby“, která je odrazem pravidelných odklonů proudu – viz obrázek č.36.

Pro analýzu kmitů je důležitou hodnotou zjištění hodnoty frekvence. Frekvence byly měřeny snímačem, a to pro různé vzdálenosti dutiny od ústí trysky m a pro různé objemové toky \dot{V} . Naměřené hodnoty byly zpracovány formou grafů, v nichž jsou místo objemových toků uvedeny odpovídající rychlosti proudění. Závislost frekvence f na délce dutiny n byla zpracována pro různé mezery m a pro různé objemové toky \dot{V} – viz graf č.18.

V grafech je vidět, že frekvence nejen že nejsou konstantní v celém rozsahu proměnných, ale mají periodický charakter. V závislosti na změnách délky dutiny frekvence rostou nebo klesají. Nejvyšší frekvence se střídají s nejnižšími, přičemž extrémy byly naměřeny při délkách dutiny, odpovídajícím násobkům vzdálenosti dutiny od ústí trysky. To znamená, že pro $m=7$ cm dochází ke změně charakteru závislosti $n=7, 14, 21, 28$ cm, pro $m=8$ cm při $n=8, 16, 24, 32$ cm, atd.

Střídání maxim a minim je pravidelné, při sudých násobcích dosahují frekvence lokálních maxim, při lichých násobcích lokálních minim. Kromě toho se hodnoty lokálních maxim

frekvencí s narůstající délkou dutiny snižují, zatímco lokální minima se udržují na konstantní hodnotě.

Popsané jevy jsou zřetelnější a přesnější na grafech pro vyšší hodnoty m . Je to ovlivněno metodou identifikace vhodného místa pro měření frekvencí (obrázek č.70). Výběr konkrétního bodu pro provedení měření se hledá v doporučených oblastech a používá se k tomu snímač frekvence kmitání a výšky hladiny. Nalezení konkrétního bodu je relativně pracné, protože by to měl být bod, v němž hladina nejvíce kmitá, tj. místo, kde je největší rozdíl mezi lokálním minimem výšky hladiny a lokálním maximem výšky hladiny. Tato činnost je náročná a je nutno ověřit několik míst a to „nejlepší“ vybrat. Je tedy jasné, že v omezeném prostoru, složeném z miniaturních rozdílně se chovajících oblastí, je to dost těžké. Navíc při malých hodnotách m nevznikají pravidelné pulsace zdaleka tak ochotně, jako když je $m > 10 \text{ cm}$. Toto omezení zcela určitě souvisí i s příčnými rozměry modelové sestavy, se šířkou dutiny a šířkou přítoku – trysky (šířka dutiny je konstantní – $y_N = 92 \text{ mm}$, šířka tryska na přítoku je $y_T = 20 \text{ mm}$). Je-li tvar dutiny blízký „čtverci“, vytváří se velké „kulaté víry“, odklony proudu nastávají snadněji, a tedy i dříve, než když je dutina podlouhlá, případně extrémně dlouhá. Tehdy se z několika slabých malých vírů tvoří nejprve podlouhlé ovály, ty se zakulacují a drží se v oblasti dutiny blíže k trysce přítoku. Vodu na opačném konci dutiny (vzdálenějším od přítoku), přitékající proud prakticky neovlivňuje. Při přímém pozorování hladiny je zjištělý nepatrný pohyb, avšak na vizualizaci ho nelze rozpoznat. Důvodem je to, že v klidné vodě se hliník, původně plovoucí po hladině, ponořuje do očerněné vody, „zmizelé“ stopovací částice nemohou být zobrazeny.

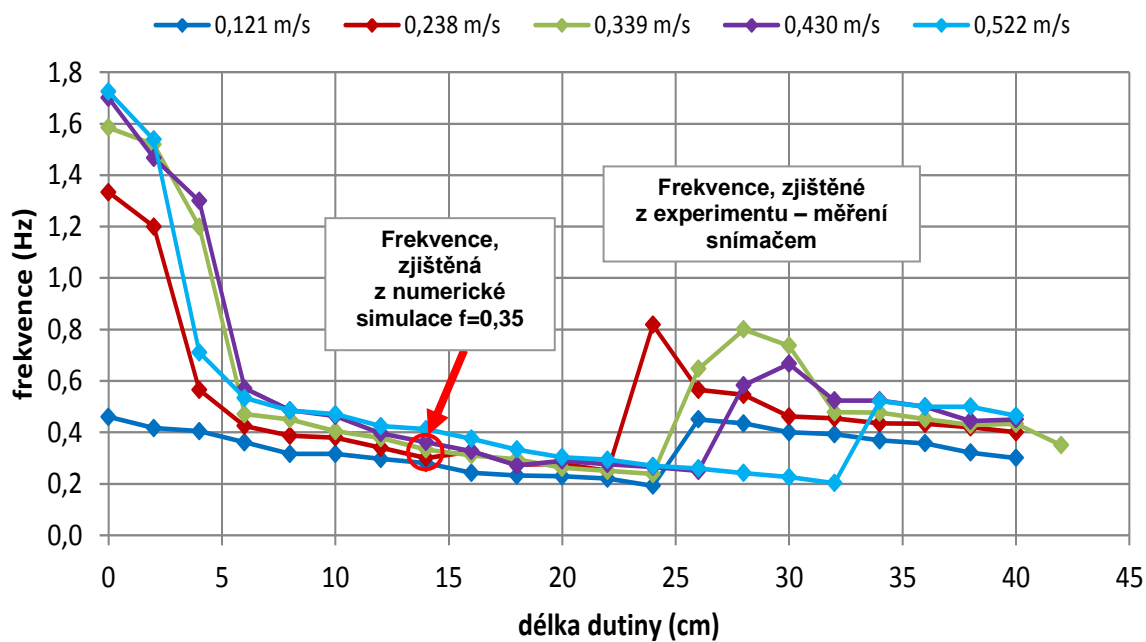
Zajímavé srovnání je možné díky numerické simulaci úlohy pro poměr sestavy (1:1), mezeru 14 cm a objemový tok $300 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Zjištěná frekvence $f_{\text{simulace}} = 0,35$ je velmi blízká hodnotě, změřené snímačem frekvencí: $f_{\text{experiment}} = 0,36$ – viz graf č.18.

Naměřené frekvence byly použity pro výpočet Strouhalova čísla. Závislost Strouhalova čísla na délce dutiny n je v grafu č.19.

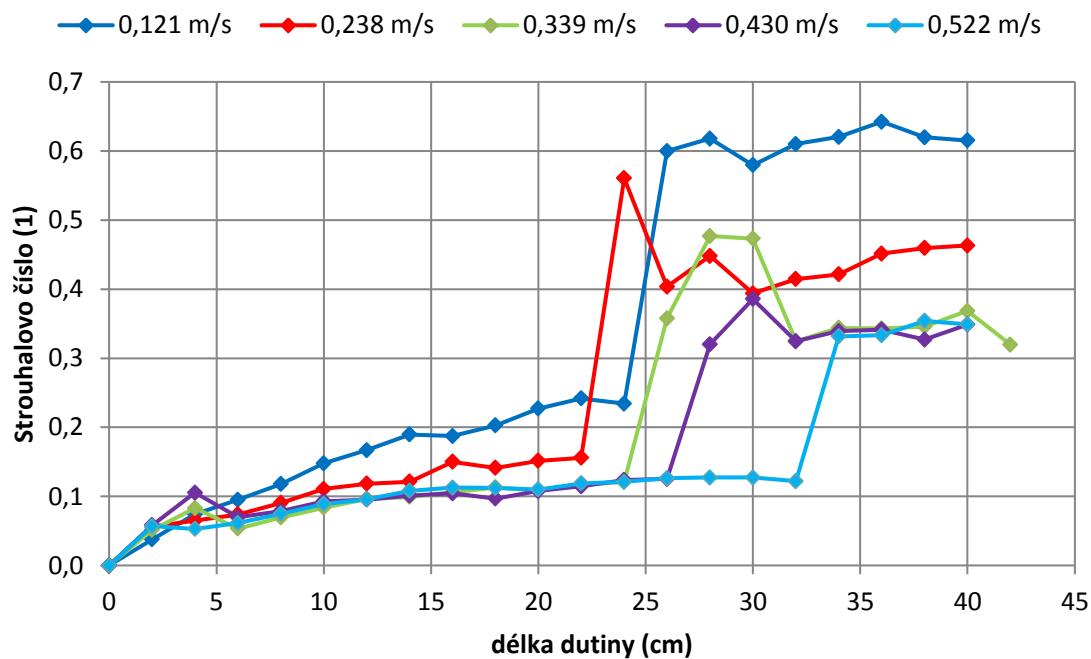
V grafech č.18 a 19 jsou skokové změny v oblasti délky dutiny od 22 do 34 cm v průběhu jednotlivých křivek. Tuto „skokovou“ změnu lze pozorovat také v grafu č.20.

Pro délky dutiny do 22 cm se Strouhalovo číslo pohybuje pod hodnotami 0,17 a průběh má klesající tendenci. Při délkách dutiny nad 36 cm má Strouhalovo číslo vyšších hodnoty (nad 0,25), ale tendence je v celém rozsahu klesající. Změna tendence v rozsahu Reynoldsových čísel 679 až 861 a „nestability“ v délkách dutin 24 až 34 cm jsou zřejmě důsledkem „nevhodné“ kombinace polohy zkoumané geometrie na modelovém stole a přítokové rychlosti. Vzdálenost modelové sestavy od odtokové hrany je omezena velikostí pracovní plochy. Ta by byla potřeba delší, aby odtékající vody měla klidnou hladinu a měření neovlivňovaly zpětné vlny.

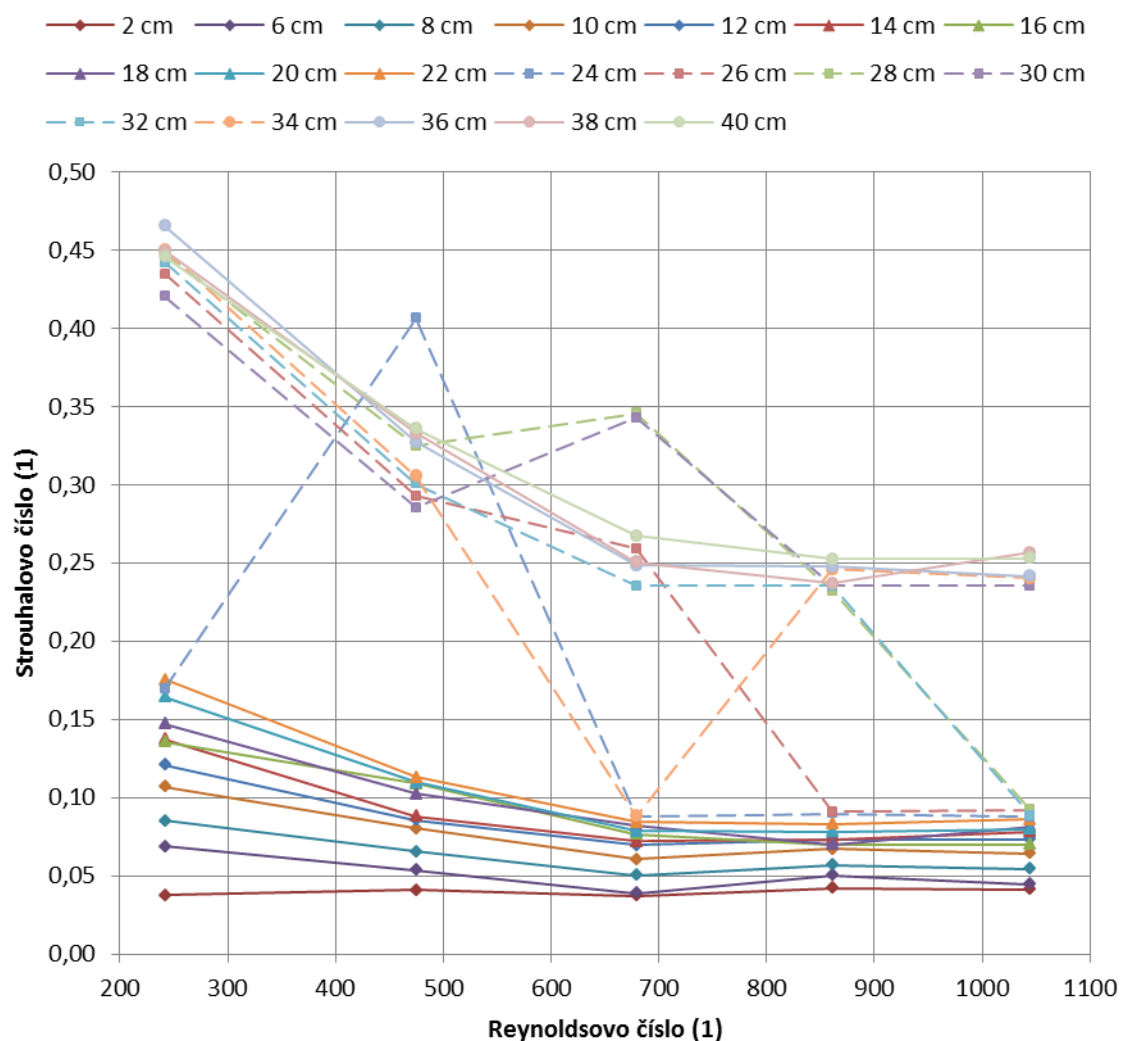
Skokové změny v průběhu závislosti jsou zřejmě generovány vývojem resp. nestabilitou koherentních vírových struktur. S rostoucím průtokem se realizují důsledky rostoucí vstupní okrajové podmínky – intenzity turbulence. Její charakter bude v rámci pokračovní disertační práce podrobněji analyzován.



Graf 18 Závislost frekvence f kmitání vodní hladiny dutiny na délce dutiny n pro různé rychlosti w_T . Měřeno pro mezeru $m=14$ cm.



Graf 19 Závislost Strouhalova čísla Sh na délce dutiny n pro různé rychlosti w_T . Měřeno pro mezeru $m=14$ cm.



Graf 20 Závislost Strouhalova čísla Sh na Reynoldsově čísle Re pro nesymetrickou dutinu
Měřeno pro mezeru $m=14$ cm.

V průběhu zpracovávání dizertační práce byla realizována rekonstrukce pojezdů hydrodynamické van. Jednalo se o odstranění nevyhovujících masivních kolejnic s rolnami pod pojezdovou rampou pro záznamovou techniku a nahrazení traverzovacím zařízením – viz kapitola 5.2.6. Tato rekonstrukce je velkým přínosem z hlediska kvality i kvantity měření. Manipulace s jednotlivými pojezdy traverzovacího zařízení je snadná, rychlá a přesná, díky měřítkům lze stanovit body pro jednotlivá měření. Lze měřit v bodech na přímce, na křivce, v ortogonální síti. Přesnost měření je umocněna možností přiblížení se k místu měření ve svislém směru – umožňuje to stavitelná plošina. Veškeré geometrické parametry (rozměry modelové sestavy, vzájemné polohy dílů modelové sestavy, polohy bodů pro měření, apod.) lze kontrolovat úchytkoměrem, připevněným na traverzěru.

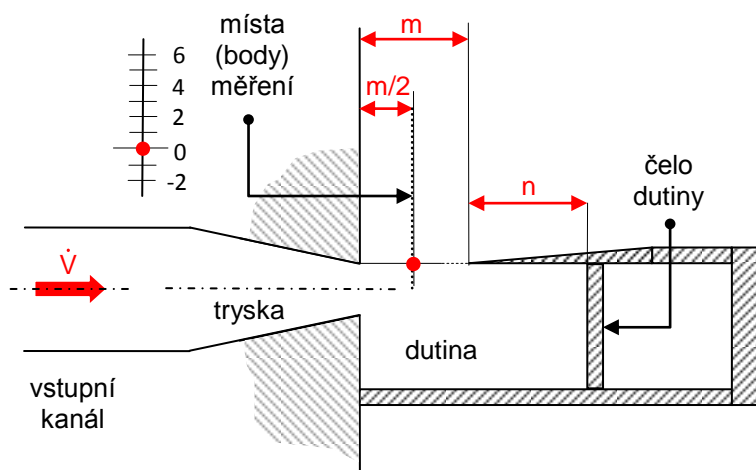
Během experimentu vznikají v proudícím médiu lokální minima a maxima výšky hladiny. Extrémy lze identifikovat pomocí vlasové redukce, připojené k měřicí sondě. Polohu nalezeného bodu lze definovat z hodnot na měřítkách traverzovacího zařízení, vlastní hodnoty výšek hladiny se změří měřicí sondou bez redukce.

Naměřené hodnoty na modelu se porovnávají s odpovídajícími hodnotami na díle, výhodou je opakovatelnost a spolehlivost (definovaná místa lze najít pomocí měřítek traverz-

ru). Snadná manipulace dovoluje získat nesrovnatelně většího objemu dat, než tomu bylo před rekonstrukcí.

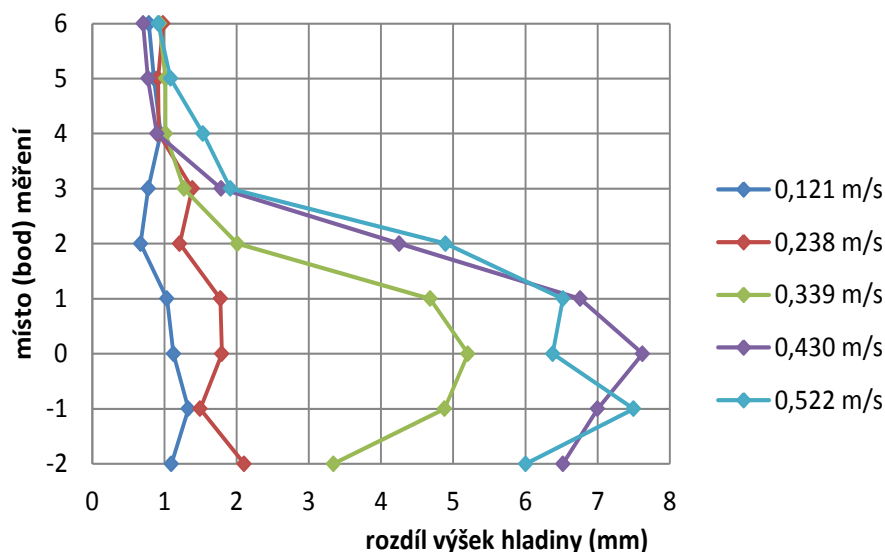
Experiment, při němž byla provedena nová měření, byl uskutečněn pro konstanty $y_K = 86 \text{ mm}$ (šířka přítokového kanálu), $y_T = 20 \text{ mm}$ (šířka trysky), $y_N = 92 \text{ mm}$ (šířka dutiny), $m = 14 \text{ cm}$ (mezera) a proměnné $n = 0 \div 40 \text{ cm}$ (délka dutiny – měřeno po 2 cm) a $\dot{V} = 100, 200, 300, 400 \text{ a } 500 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ (objemové toky). Objemové toky byly nastaveny v „celých“, odpovídající rychlosti jsou uvedeny v tabulce č.3. Pro měření byly vybrány dvě oblasti, ústí trysky přítokového kanálu a mezera mezi ústím trysky a hranou dutiny. S ohledem na oblasti, vyznačené na obrázku č.70, bylo pro měření v mezeře stanoveno několik bodů v ose mezery – viz obrázek č.73.

Nejprve byly měřeny výšky hladiny, jako druhé v pořadí byly měřeny frekvence. Při měření výšek hladiny byly identifikovány lokální extrémy (h_{\max} a h_{\min}) a následně vyhodnocena maximální výchylka hladiny (Δh). Bylo měřeno v místech dle obrázku č.73, od bodu „0“ směrem do dutiny v bodech, označených „-1“ a „-2“, směrem ven z dutiny v bodech „1“ až „6“. Počet měřicích míst směrem dovnitř byl volen s ohledem na geometrii modelu, směrem ven byly přidávány body tak dlouho, až se ve 3 po sobě jdoucích místech přestala hodnota Δh významným způsobem měnit, tj. $\Delta h < 1 \text{ mm}$. Výchylky Δh byly vyhodnocovány s cílem najít ideální místo pro měření pulsace hladiny. Toto místo (resp. bod) by mělo vykazovat maximální hodnoty Δh pro danou geometrii. Čím větší je výchylka výšky hladiny, tím snadněji lze selektovat charakteristické periodické pulsace. V případě měření frekvence v místě malých výchylek hladiny se může stát, že kromě pulsací hladiny, charakteristických pro odklápění proudu mezi dutinou a okolím, jsou registrovány poruchy jiného původu. Jsou-li tyto poruchy srovnatelné s měřenou veličinou, snímač zaznamená vyšší frekvenci než odpovídá skutečné frekvenci odklonů proudu a výsledky měření zkreslí. Existenci uvedených poruch lze kontrolovat přímým pozorováním během experimentu.



Obr. 73 Místa měření výchylek pulsující hladiny

Na grafu č.21 jsou výsledky měření výšek hladiny $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$, z průběhu vyplývá, že maximální výchylky byly zjištěny v místě „0“. Podobným způsobem by mohl být proměřen celý prostor mezery a pro jednotlivé modelové sestavy a určité ideální místo pro měření frekvencí – v místě největší výchylky hladiny lze nejnadhěji odlišit frekvence, způsobené pulsací v dutině od frekvencí, vybuzených poruchami jiného původu (například zpětné odrazy od výstupu).



Graf 21 Změna výšky pulsující hladiny Δh pro různé rychlosti proudění w_T

Výchylka pulzující hladiny $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$, h_{\max} , h_{\min} jsou maximální a minimální výšky hladiny v bodě.

6.4.3 Možnosti využití výsledků měření – nesymetrická dutina

Výsledky měření výšek hladiny a frekvence jejího kmitání, získané při experimentování ve vodě, lze použít pro plyn - [3], [4]. Z výšky hladiny vody lze určit hodnoty tlaku, teploty a hustoty plynu – tabulka č.1, z frekvence kmitání vodního objemu hodnoty frekvence kmitání vzdušného objemu.

Měření výšek hladiny bylo provedeno na přítoku (v přítokovém kanále), na vstupu do modelové sestavy (v ústí trysky), v modelové sestavě (v prostoru mezery – viz obrázek č.73), a v prostoru za ní (na odtokové hraně výstupní komory). Různá místa měření složí k různým účelům: výšky hladiny na přítoku a v trysce se používají při výpočtu středních rychlostí proudění, výšky hladiny v modelu a daleko za ním jsou důležité pro analogii mezi prouděním kapaliny a plynu – viz tabulka č.1. Místo měření za modelovou sestavou by mělo být tam, kde vodní hladina nekmitá. Toto místo je referenční pro vodu, a u vzduchu pak odpovídá stavu „atmosféry“. Vztah mezi tlakem vzduchu a výškou vodní hladiny pro objemový průtok 300 l/h je v tabulkách č.4 a 5, grafické zpracování pro několik objemových toků je v grafu č.22.

Tab. 4 Tlak vzduchu, určený plynu z výšky hladiny – měření v mezeře

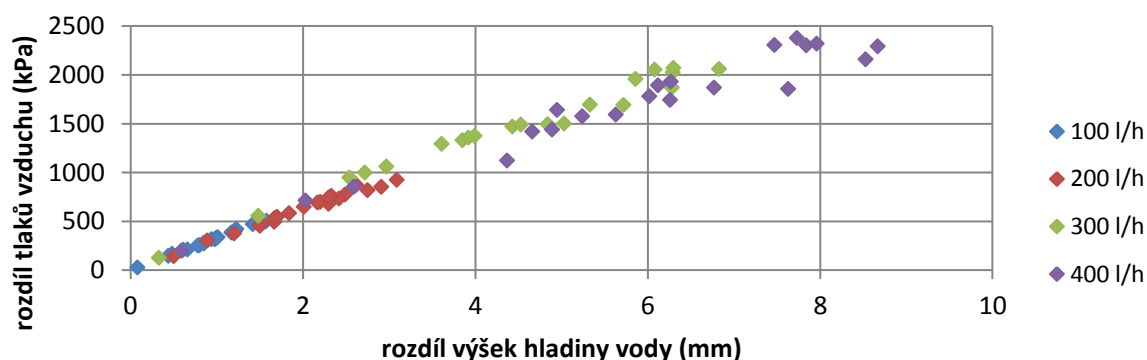
n je délka dutiny, $h_{M\max}$, $h_{M\min}$ jsou maximální a minimální výšky hladiny vody, $p_{D\max}$, $p_{D\min}$ jsou maximální a minimální tlaky vzduchu, Δp_D je tlakový rozdíl, $p_{D\text{stř}}$ je střední hodnota tlaku. Referenční hodnota tlaku je 100 kPa. Měřeno v mezeře modelové sestavy, pro mezeru 14cm a objemový tok 300l/h.

místo měření	$h_{M\max}$	$h_{M\min}$	$p_{D\max}$	$p_{D\min}$	Δp_D	$p_{D\text{stř}}$
-2	9,63	6,29	205359	87612	117747	146485
-1	9,98	5,1	220558	57597	162961	139078
0	10,35	5,145	237215	58618	178597	147917
1	10,525	5,845	245305	75654	169651	160479
2	8,22	6,21	149625	85397	64228	117511
3	7,48	6,21	123898	85397	38501	104648
4	7,44	6,425	122577	91413	31164	106995
5	7,405	6,39	121426	90420	31006	105923
6	7,315	6,385	118492	90278	28214	104385

Tab. 5 Tlak vzduchu, určený z výšky hladiny vody – měření v trysce

n je délka dutiny, h_{Mmax} , h_{Mmin} jsou maximální a minimální výšky hladiny vody, p_{Dmax} , p_{Dmin} jsou maximální a minimální tlaky vzduchu, Δp_D je tlakový rozdíl pro vzduch, $p_{Dstř}$ je střední hodnota tlaku vzduchu. Referenční hodnota atmosférického tlaku je 100 kPa. Měřeno v trysce pro mezeru 14cm a objemový tok 300l/h.

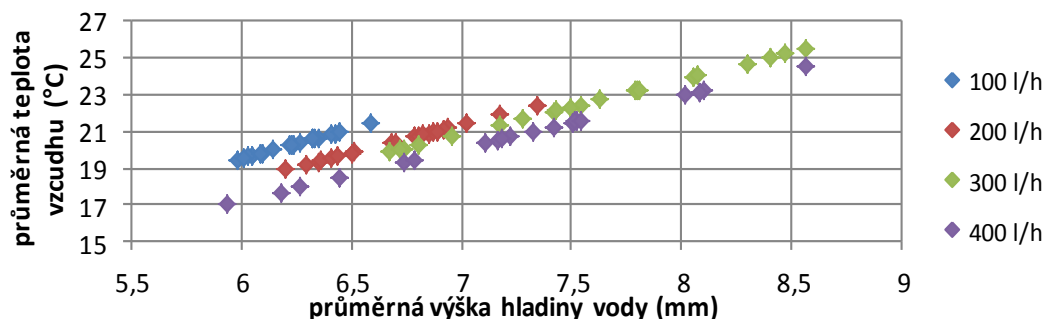
n	h_{Mmax}	h_{Mmin}	p_{Dmax}	p_{Dmin}	Δp_D	$p_{Dstř}$
(cm)	(mm)	(mm)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
0	8,73	8,4	168768	156250	12518	162509
2	9,21	7,73	187837	132318	55518	160078
4	9,68	7,14	207497	112891	94607	160194
6	9,25	4,22	189472	39435	150037	114454
8	9,53	3,81	201116	32145	168971	116631
10	10,22	3,39	231293	25448	205845	128371
12	9,86	3,58	215286	28381	186905	121833
14	10,67	4,59	252110	46654	205456	149382
16	10,42	4,13	240435	37771	202663	139103
18	10,57	4,27	247407	40375	207031	143891
20	10,47	4,61	242748	47061	195686	144904
22	9,84	4,51	214413	45042	169372	129727
24	9,38	4,54	194835	45643	149192	120239
26	9,72	5,87	209216	76302	132913	142759
28	9,54	6,57	201539	95586	105953	148562
30	9,78	5,79	211806	74237	137570	143022
32	9,88	6,27	216160	87056	129104	151608
34	9,77	5,85	211374	75783	135590	143578
36	9,71	5,28	208785	61735	147051	135260
38	9,69	5,16	207926	58960	148966	133443
40	9,66	6,94	206641	106655	99986	156648



Graf 22 Závislost tlaku vzduchu na výšce vodní hladiny pro různé objemové toky

Měřena byla výška hladiny v trysce h_T pro různé délky dutiny n v rozmezí 0 až 40 cm a pro různé objemové toky. Výška hladiny v trysce h_T nemá stálou polohu, kmitá. V grafu je vynesena rozdíl výšek hladiny $\Delta h = h_{max} - h_{min}$, h_{max} , h_{min} jsou maximální a minimální výšky hladiny v bodě. Tlakový rozdíl odpovídá rozdílu hladin. Měřeno pro mezeru 14 cm.

Podobně lze z výšky hladiny vody vyhodnotit zjistit teplotu a hustotu plynu – viz tabulky č.6 a 7. Grafické zpracování výška hladiny-teplota pro několik objemových toků je v grafu č.23, graf výška-hustota vypadá vzhledem k podobnosti přepočtovému vztahu pro teplotu a hustotu podobně, jako graf výška-teplota.



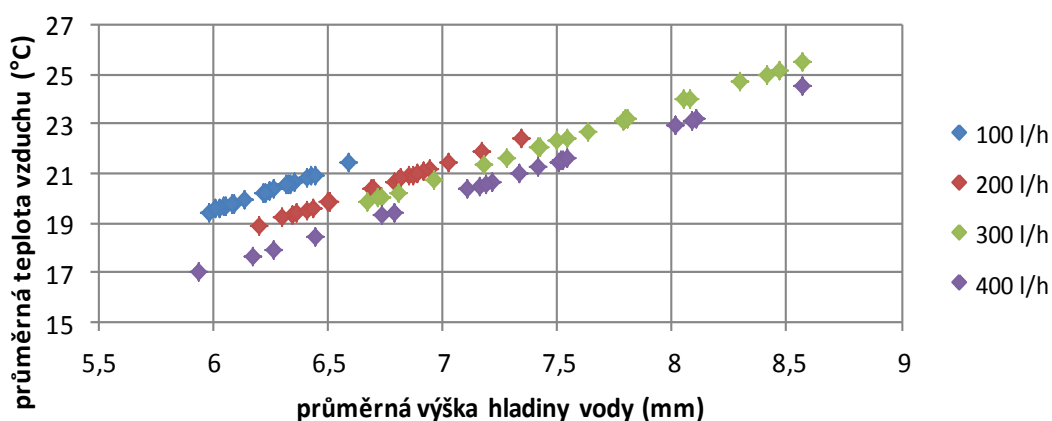
Graf 23 Závislost teploty vzduchu na výšce vodní hladiny pro různé objemové toky

Měřena byla výška hladiny v mezeře m pro různé délky dutiny n v rozmezí 0 až 40 cm a pro různé objemové toky. Výška hladiny v mezeře kmitá, pro výpočet průměrné teploty byla použita průměrná hodnota výšky hladiny, zjištěná z , tj. z jsou maximální a minimální výšky hladiny v bodě. Měřeno v mezeře 14 cm

Tab. 6 Teplota a hustota plynu, určené z výšky hladiny vody – měření v trysce

n je délka dutiny, t_{Dmax} , t_{Dmin} jsou maximální a minimální teploty vzduchu, $t_{Dstř}$ je střední teplota vzduchu, ρ_{Dmax} , ρ_{Dmin} jsou maximální a minimální hustoty vzduchu, $\rho_{Dstř}$ je střední hodnota hustoty vzduchu. Referenční teplota atmosféry je 20°C, hustota 1,189 kg/m³. Měřeno v trysce pro mezeru 14cm a objemový tok 300l/h

n	t_{Dmax}	t_{Dmin}	$t_{Dstř}$	ρ_{Dmax}	ρ_{Dmin}	$\rho_{Dstř}$
0	25,98	25,00	25,49	1,545	1,486	1,515
2	27,41	23,01	25,21	1,630	1,368	1,499
4	28,81	21,25	25,03	1,713	1,263	1,488
6	27,53	12,56	20,04	1,637	0,747	1,192
8	28,36	11,34	19,85	1,686	0,674	1,180
10	30,42	10,09	20,25	1,808	0,600	1,204
12	29,35	10,65	20,00	1,745	0,633	1,189
14	31,76	13,66	22,71	1,888	0,812	1,350
16	31,01	12,29	21,65	1,844	0,731	1,287
18	31,46	12,71	22,08	1,870	0,756	1,313
20	31,16	13,72	22,44	1,853	0,816	1,334
22	29,29	13,42	21,35	1,741	0,798	1,270
24	27,92	13,51	20,71	1,660	0,803	1,231
26	28,93	17,47	23,20	1,720	1,039	1,379
30	29,11	17,23	23,17	1,730	1,024	1,377
32	29,40	18,66	24,03	1,748	1,109	1,429
34	29,08	17,41	23,24	1,729	1,035	1,382
36	28,90	15,71	22,31	1,718	0,934	1,326
38	28,84	15,36	22,10	1,714	0,913	1,314
40	28,75	20,65	24,70	1,709	1,228	1,469



Graf 23 Závislost teploty vzduchu na výšce vodní hladiny pro různé objemové toky

Měřena byla výška hladiny v mezeře h_M pro různé délky dutiny n v rozmezí 0 až 40 cm a pro různé objemové toky. Výška hladiny v mezeře kmitá, pro výpočet průměrné teploty byla použita průměrná hodnota výšky hladiny, zjištěná z h_{\max} , h_{\min} , tj. z jsou maximální a minimální výšky hladiny v bodě. Měřeno v mezeře 14 cm.

Tab. 7 Teplota a hustota plynu, určené z výšky hladiny vody – měření v mezeře

n je délka dutiny, $t_{D\max}$, $t_{D\min}$ jsou maximální a minimální teploty vzduchu, $t_{D\text{stř}}$ je střední teplota vzduchu, $\rho_{D\max}$, $\rho_{D\min}$ jsou maximální a minimální hustoty vzduchu, $\rho_{D\text{stř}}$ je střední hodnota hustoty vzduchu. Referenční teplota atmosféry je 20°C, hustota 1,189 kg/m³. Měřeno v mezeře modelové sestavy, pro mezeru 14 cm a objemový tok 300 l/h

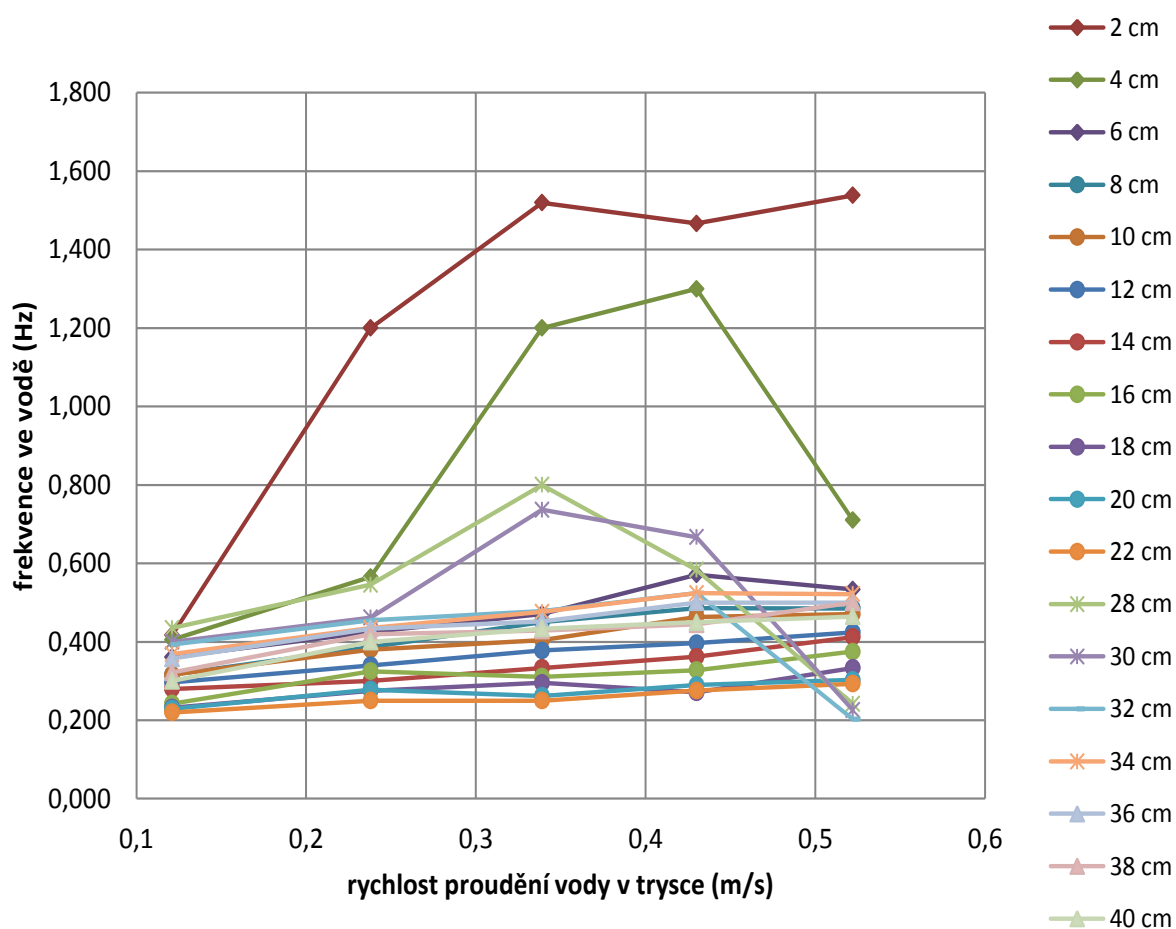
místo měření	$t_{D\max}$	$t_{D\min}$	$t_{D\text{stř}}$	$\rho_{D\max}$	$\rho_{D\min}$	$\rho_{D\text{stř}}$
	(°C)	(°C)	(°C)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
-2	28,66	18,72	23,69	1,704	1,123	1,414
-1	29,70	15,18	22,44	1,766	0,911	1,338
0	30,80	15,31	23,06	1,831	0,919	1,375
1	31,32	17,40	24,36	1,862	1,044	1,453
2	24,46	18,48	21,47	1,454	1,109	1,282
3	22,26	18,48	20,37	1,323	1,109	1,216
4	22,14	19,12	20,63	1,316	1,147	1,232
5	22,04	19,02	20,53	1,310	1,141	1,226
6	21,77	19,00	20,39	1,294	1,140	1,217

Frekvence kmitání hladiny byly měřeny v mezeře, v místě „0“ (podle obrázku č.73) pro různé objemové toky a pro délky dutiny v rozmezí 0 až 40 cm. V grafu č.24 je závislost frekvence pulsace vodní hladiny f_M na střední rychlosti w_T v trysce. V grafu je vidět, že jednotlivé křivky mají rostoucí tendenci, tj při vyšší intenzitě přítoku jsou vyšší frekvence. Hodnoty frekvencí pro $n < 6$ mají odlišný průběh, protože výchylka výšky hladiny je relativně malá a ne všechny vlnky na hladině odpovídají odklápění pulsujícího proudu vody.

V následující dvou grafech č.25 a 26 lze porovnat závislost frekvence kmitání pro různé rychlosti a pro různé dlouhé délky dutiny.

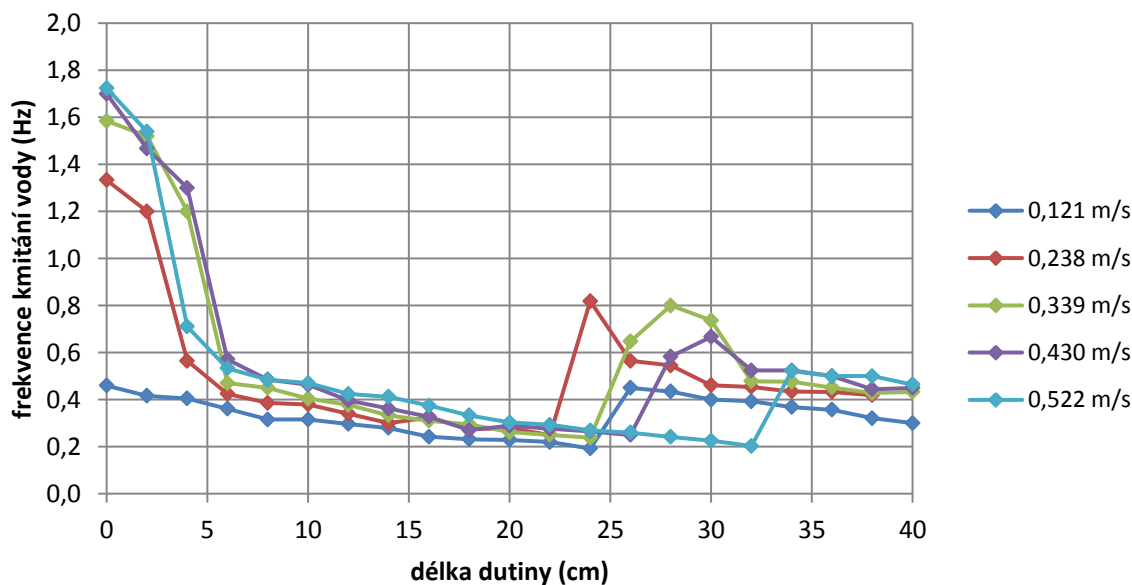
Je zřejmé, že v případě mezery 14 cm dochází ke skokovým změnám při délkách dutiny od 24 do 34 cm. Při průtoku 300 l/h dochází ke změně frekvence při $n = 28 \text{ cm}$, což odpovídá poměru $m : n = 1 : 2$. U nižších průtoků dochází ke skoku frekvence při menších délkách dutiny, u větších průtoků při větších délkách dutiny. Frekvence kmitání vodního i vzdušného objemu při plynulém zvyšování rychlosti proudění „skáče“ po rezonančních módech. Tato skoková změna vzniká následkem energetického přebuzení, jev nastává ve vodě i ve vzduchu. V případě vzduchu se jedná o tzv „přefuk“, kdy se frekvence a tedy odpovídající tón změni o určitý interval.

Otázky tónů jsou obvyklé v hudbě, ale oktavové frekvence, resp. oktavová frekvenční pásma byla zavedena pro posuzování hluku (střední kmitočty v rozsahu $f = 16 \div 16000 \text{ Hz}$ jsou dány normou ČSN 356870). Oktavová frekvenční pásma se liší podle oblastí – v oblasti hudby jsou to frekvence $f = 220, 440, 880 \text{ Hz}$, ...atd., ale například ve vzduchotechnice jsou to hodnoty $f = 63, 125, 250, 500 \text{ Hz}$, ...atd.

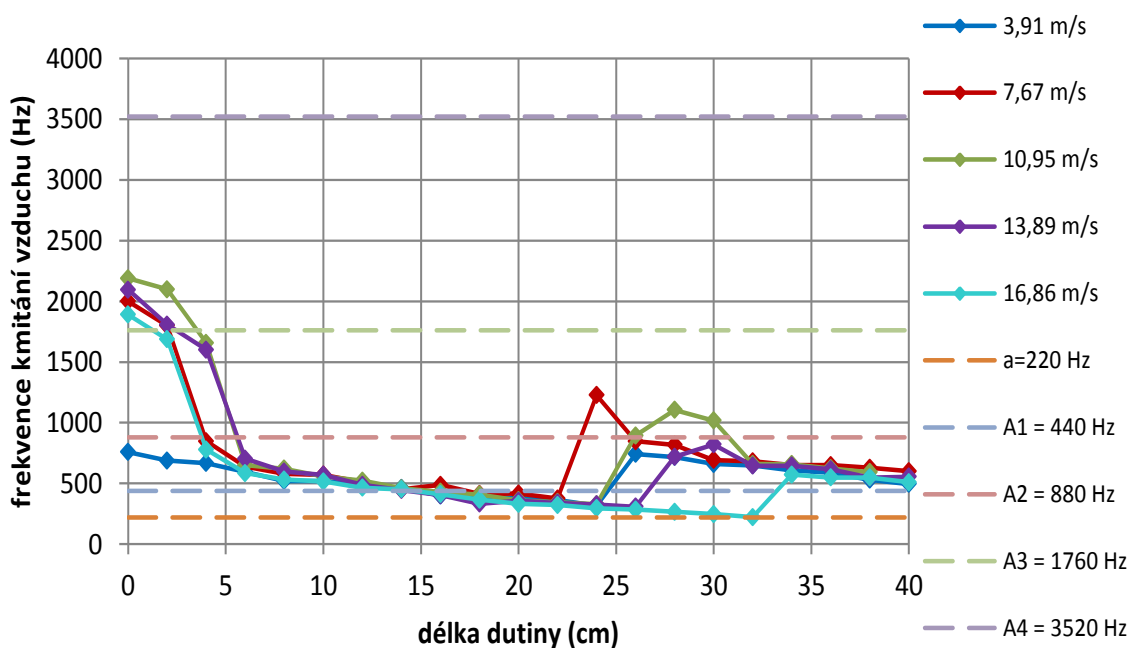


Graf 24 Závislost frekvence kmitání hladiny vody f_M uprostřed mezery v závislosti na střední rychlosti proudění w_T

Měřeno pro délky dutiny v rozmezí 0-40 cm pro, pět rychlostí (body na jednotlivých křivkách) odpovídá objemovým tokům, 100, 200, 300, 400 a 500 l/h.



Graf 25 Závislost frekvence kmitání vody f_M na délce dutiny pro různé rychlosti vody v trysce w_T

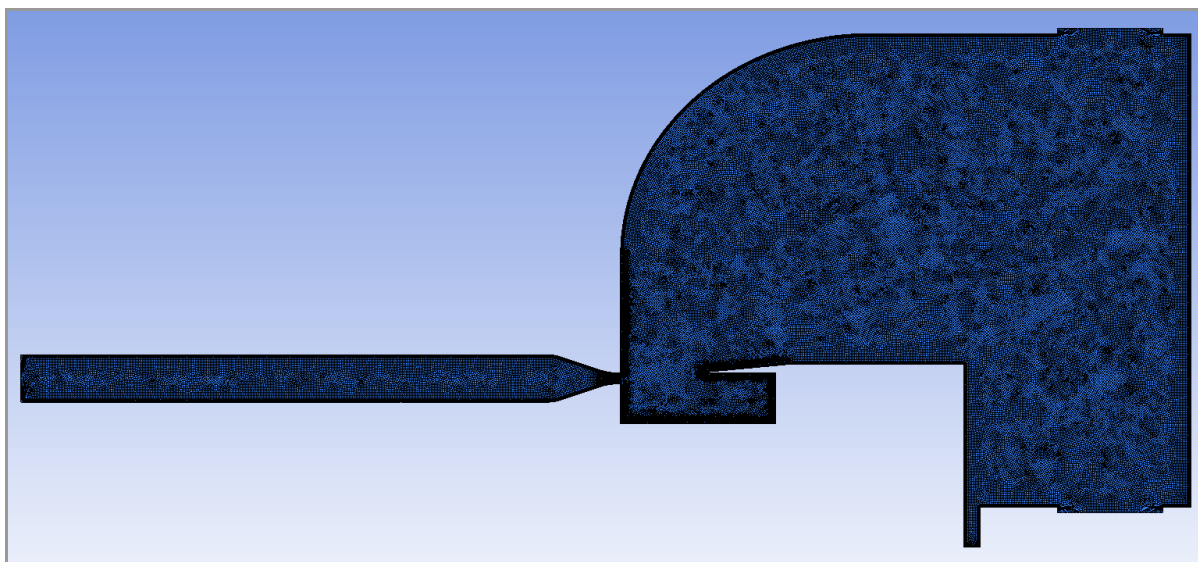


Graf 26 Závislost frekvence kmitání vzduchu f_D na délce dutiny pro různé rychlosti vzduchu v trysce

Jako zajímavost jsou v grafu naznačeny oktávové transpozice komorního A1=440 Hz (každá další transpozice je dvojnásobkem).

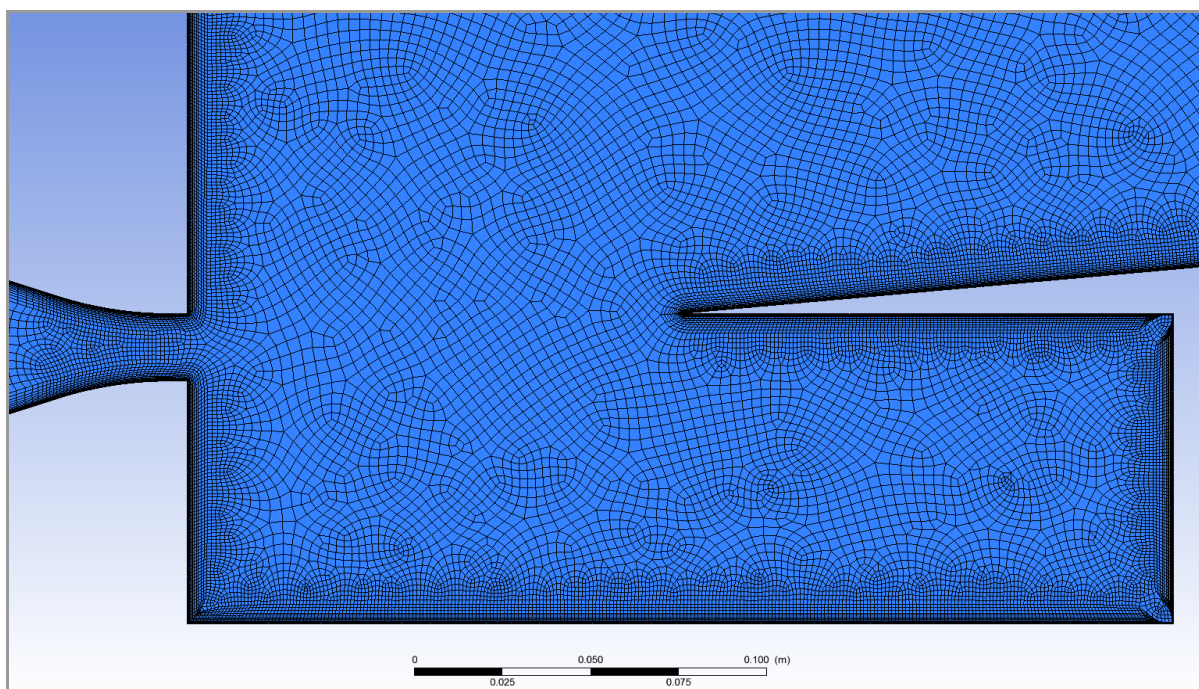
6.4.4 Numerické simulace – nesymetrická dutina

Numerická simulace byla provedena v programu Ansys Fluent 14 – [64]. V prvním kroku byl vytvořen 2D model zkoumaného experimentu. Pro tento model byla vytvořena síť v programu Ansys Meshing™ – [64]. Byla použita kombinace trojúhelníkových a obdélníkových elementů. Konečná síť měla 95000 – 110000 elementů v závislosti na nastavení parametrů geometrie modelu. Ukázka vygenerované sítě je zobrazena na obrázcích č.74 a 75 pro $m=14\text{ cm}$ a $(m:n)=(1:1)$.



Obr. 74 Celkový pohled na vygenerovanou síť

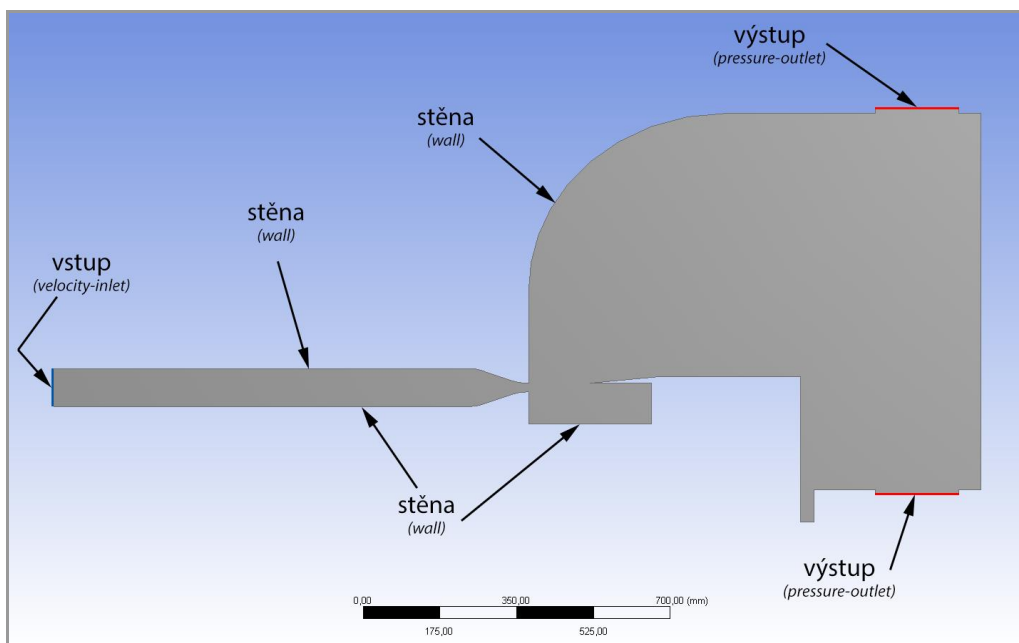
Parametry modelové sestavy jsou $m=14$ cm a $(m:n)=(1:1)$.



Obr. 75 Detail sítě dutiny

Parametry modelové sestavy jsou $m=14$ cm a $(m:n)=(1:1)$.

V numerické simulaci byl použit RANS nestacionární viskózní nestlačitelný $k-\omega$ model v SST modifikaci. Bylo simulováno pro $w_T = 0,0389 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0,0778 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0,1167 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0,1457 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0,1946 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $0,2335 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tyto rychlosti odpovídají objemovému toku $100, 200, 300, 400, 500$ a $600 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$) pro vstupní okrajovou podmínku „velocity inlet“. Výstupní okrajová podmínka byla nastavena na „pressure-outlet“. Na stěnách byla aplikována okrajová podmínka „wall“. Zobrazení okrajových podmínek je vidět na obrázku č.76.

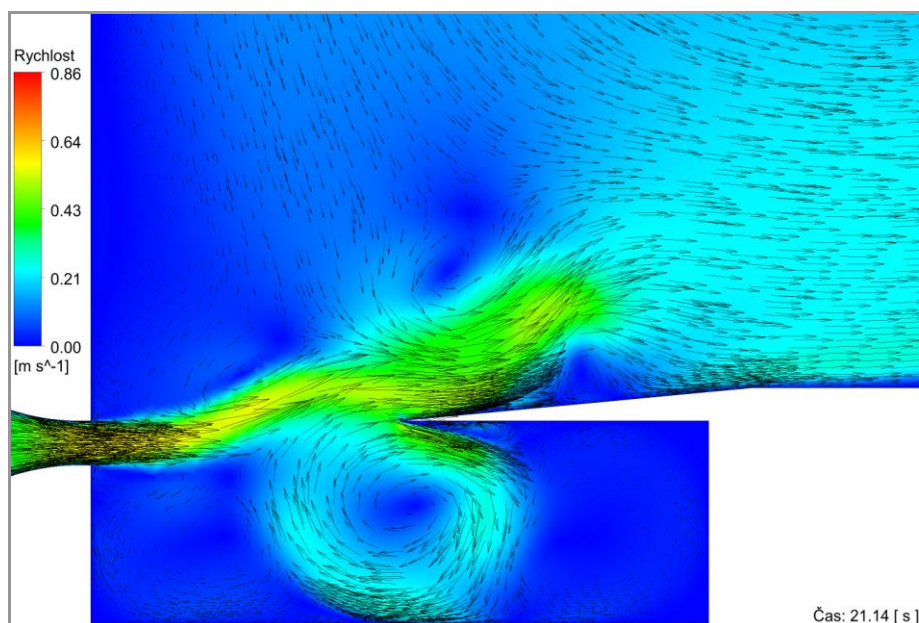


Obr. 76 Okrajové podmínky 2D varianty modelu

Parametry modelové sestavy jsou $m=14$ cm a $(m:n)=(1:1)$.

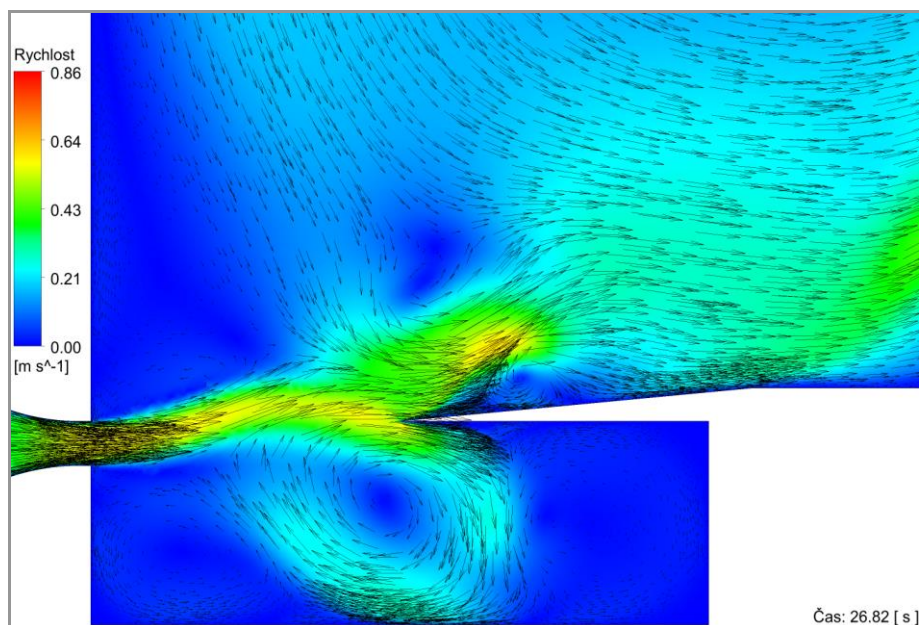
Časový krok byl nastaven na hodnotu 0,001 s. Na jeden časový krok byl nastaven maximální počet iterací roven 500. Při prvotních iteracích bylo zjištěno, že počet 15 iterací bude dostatečný. Podmínka konvergence byla stanovena na 10^{-4} pro všechny sledované veličiny. Pro každou rychlost bylo vypočteno 40 000 iterací, a tedy pro daný časový krok 40 s. Každá simulace požadovala přibližně 65 GB.

Výsledky jsou zobrazeny na obrázcích č.77 a 78. Video pro případy $m=7$ cm a pro $m=14$ cm je přiloženo na DVD.



Obr. 77 Výsledky numerické simulace – snímek v čase 21,14s

Parametry modelové sestavy jsou $m=14$ cm a $(m:n)=(1:1)$.



Obr. 78 Výsledky numerické simulace – snímek v čase 26,82s

Parametry modelové sestavy jsou $m=14\text{ cm}$ a $(m:n)=(1:1)$.

6.4.5 Porovnání numerických simulací a experimentu – nesymetrická dutina

Realizované experimenty byly zaznamenávány dvěma způsoby – fotoaparátem a videokamerou. Při porovnávání experimentu a numerické simulace byly sledovány videozáznamy a numerická animace, a také fotografie s animací, která byla posunována po jednotlivých časových krocích. Porovnávání „běžících“ záznamů reality a simulace bylo provedeno poté, co se ustálily frekvence kmitání proudu v experimentálním zařízení i v numerické simulaci.

Zvolené parametry pro posouzení:

$$m = 7 \text{ a } 14 \text{ cm}, \quad n : m = (1:0,5), (1:1), (1:2) \text{ a } (1:3),$$

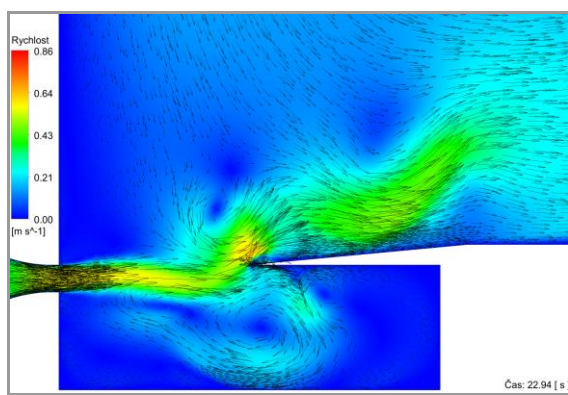
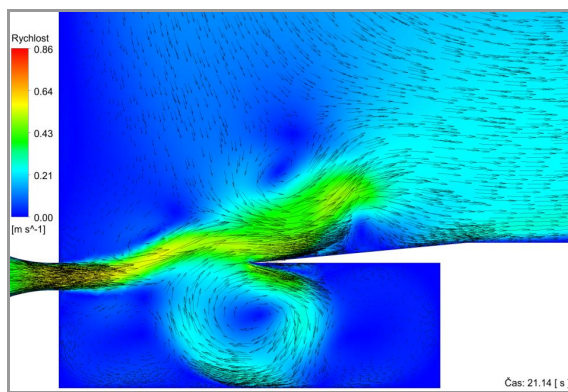
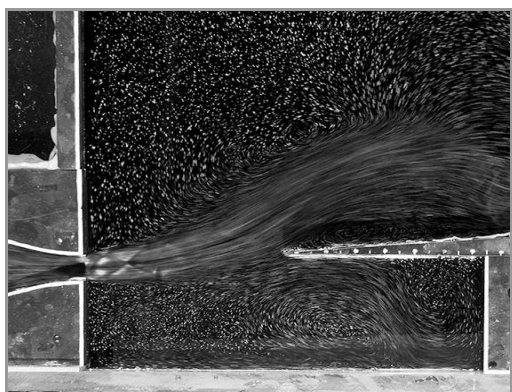
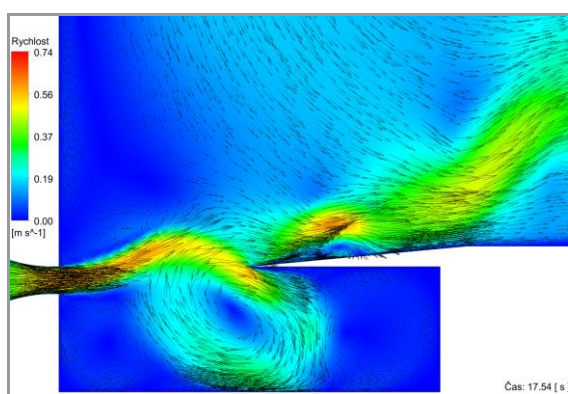
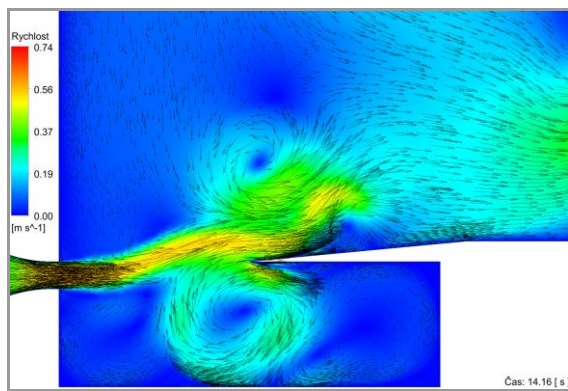
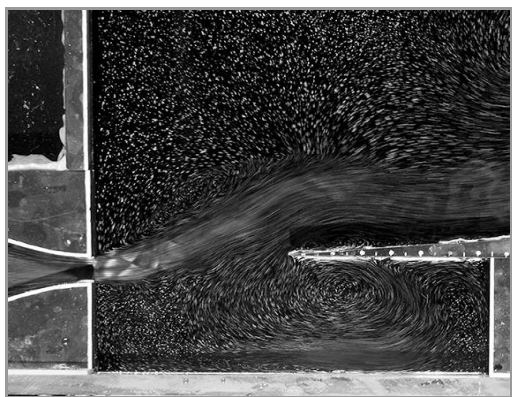
$$\dot{V} = 100, 200, 300, 400 \text{ a } 500 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Ověření ukázalo velmi dobrou „shodu“ veškerých pozorovaných jevů. Byl sledován výskyt dominantních jevů, a to vzniku, vývoje a zániku vírů uvnitř dutiny a vzhled vírové stezky, tvořící se „za“ modelovou sestavou – ukázky jsou přiloženy na DVD.

Porovnávání snímků z fotoaparátu a ze simulace je velice pracné, objem dat, který je třeba při konfrontaci projít, je značný. Pořízené fotografie je třeba prohlédnout a vybrat zdařilé (dostatek vizualizačních ingrediencí), upravit je (zvýšit kontrast převodem na černobílý) a seřadit je (podle geometrie modelové sestavy, tj. podle parametrů m a n a podle objemového toku). Tuto činnost nelze vynechat, protože jen takto lze relativně pohodlně porovnávat fotografie s jednotlivými snímky simulací. Snímky se z animací získávají tak, že se zvolí režim, v němž lze animaci posunovat po jednotlivých krocích. Ukázka výsledku této činnosti je na obrázcích č. 79 a 80.

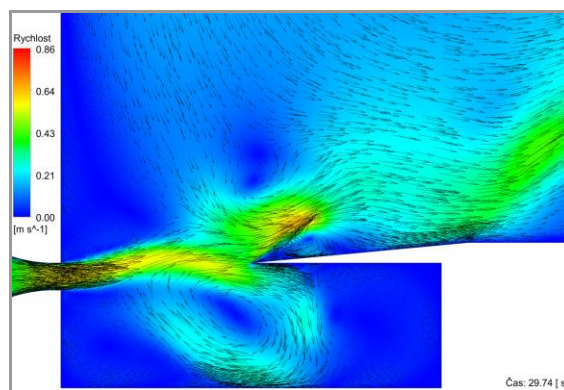
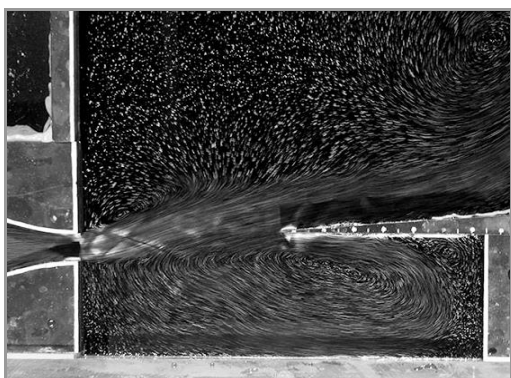
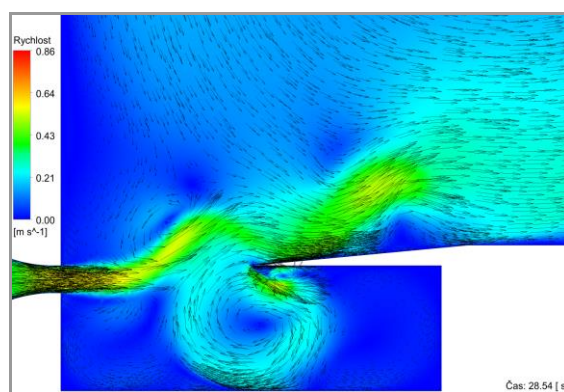
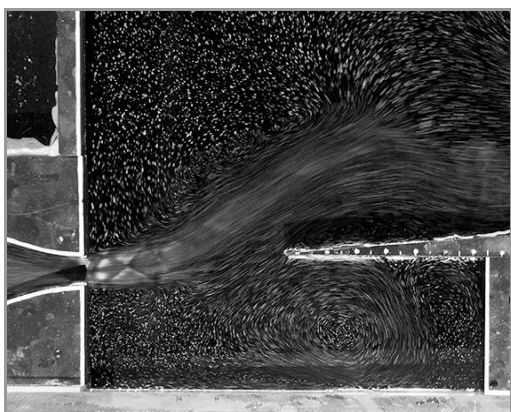
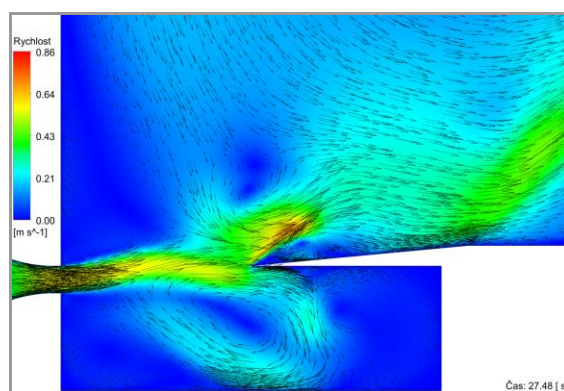
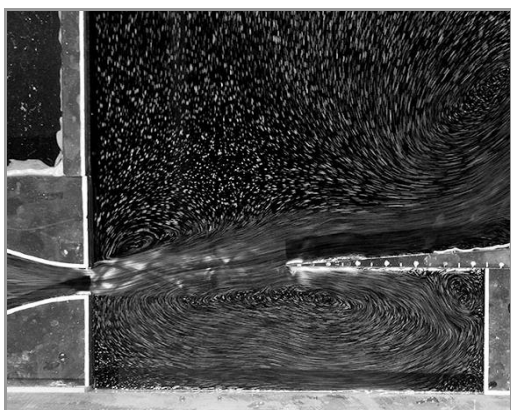
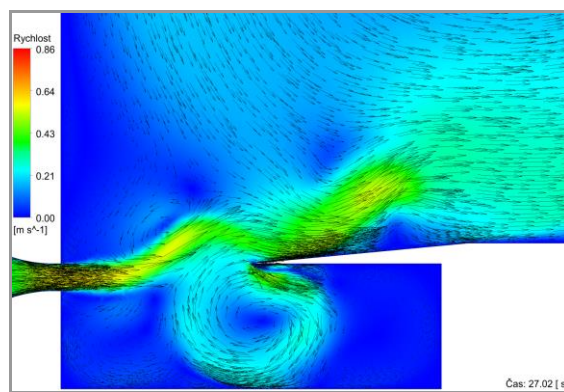
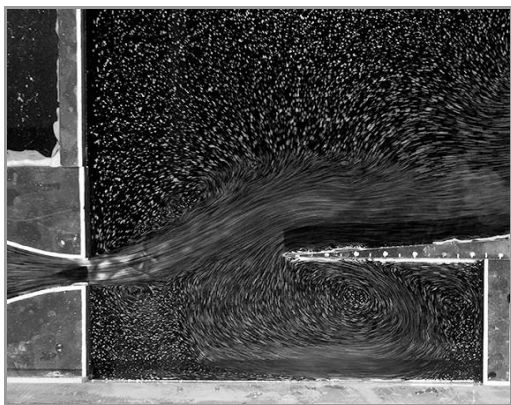
Parametry porovnávaných fotografií a snímků jsou:

$$m=14\text{ cm}, \quad n : m=(1:1), \quad \dot{V} = 300 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}.$$



Obr. 79 Porovnání fotografií vizualizace a snímků numerické simulace

Parametry: $m=14\text{ cm}$ a $(m:n)=(1:1)$, $\dot{V} = 300\text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. Expoziční doba u vizualizace je $1/15\text{ s}$.



Obr. 80 Porovnání fotografií vizualizace a snímků numerické simulace

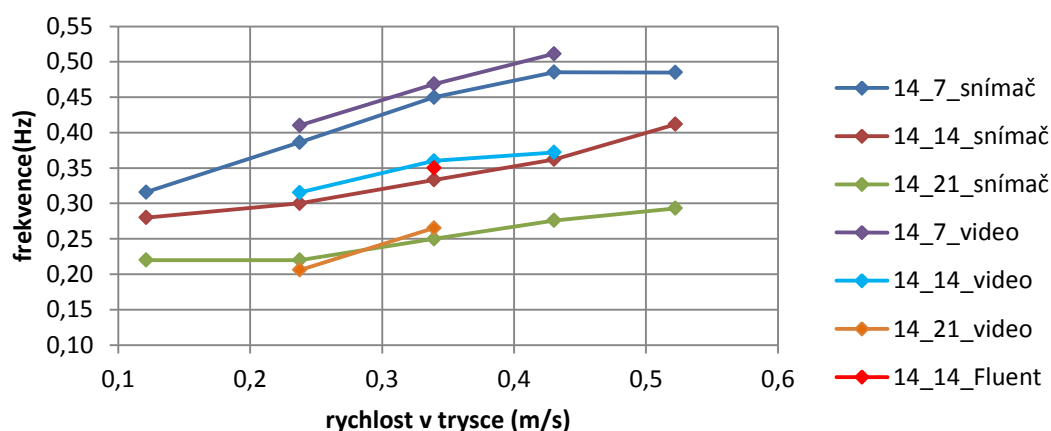
Parametry: $m=14$ cm a $(m:n)=(1:1)$, $\dot{V} = 300$ l · h⁻¹. Expoziční doba u vizualizace je 1/15s.

Po vyhodnocení fotografií a snímků simulace bylo zjištěno, že shody nejsou tak příznivé, jak se to jevílo při porovnávání videa a animace. Zjistilo se, že víry které v experimentu zasahovaly jako velké ovály, vyplňující celý prostor dutiny jsou v animaci mnohem menší, vyplňují jen část dutiny, bližší k ústí přítoku.

Databáze fotografií provedeného experimentu je v příloze na DVD a je seříděna podle úrovně úprav a podle velikosti mezery, délky dutiny a objemového toku.

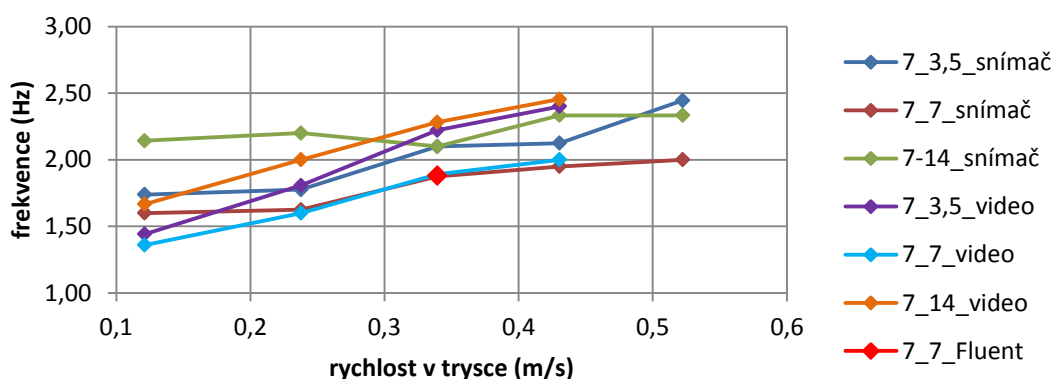
Experiment a jeho výsledky byly prezentovány v publikacích [A1], [A8], [A9] a [A10].

V rámci porovnávání numerické simulace a experimentu byly zpracovány grafické závislosti frekvence kmitání vodní hladiny na rychlosti pro dvě velikosti mezery – graf č.27 a 28. V grafech jsou zpracovány výstupy, získané z měření snímačem, z analýzy videozáznamu a pro ilustraci také z numerické simulace. Hodnoty Strouhalova čísla v závislosti na Reynoldsově čísle jsou v grafech č.29 a 30 Graf 30.

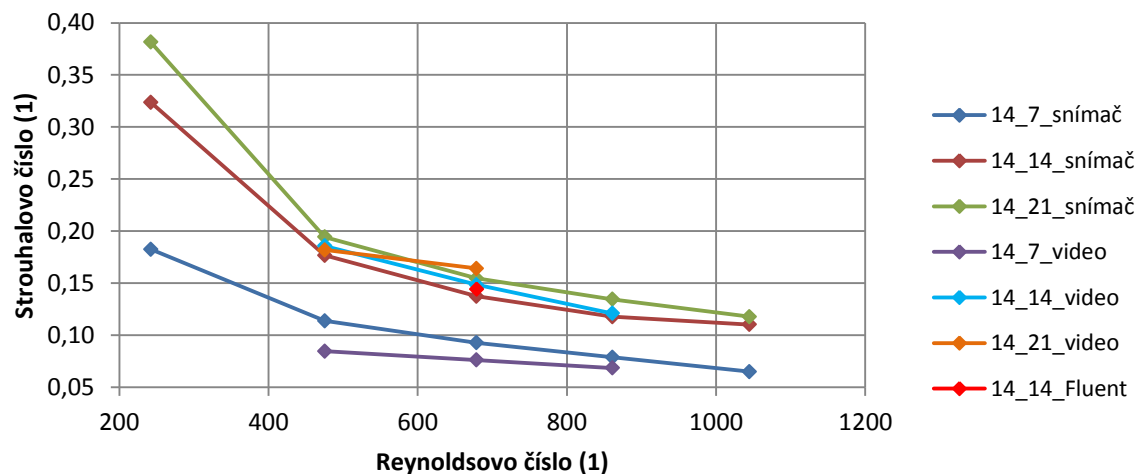


Graf 27 Frekvence pulsací vody f v závislosti na střední rychlosti proudu w_T pro mezeru 14 cm

Porovnání metod určení frekvencí (snímač frekvence kmitání vodní hladiny, analýza videozáznamu vizualizace, numerická simulace, osciloskopická karta)

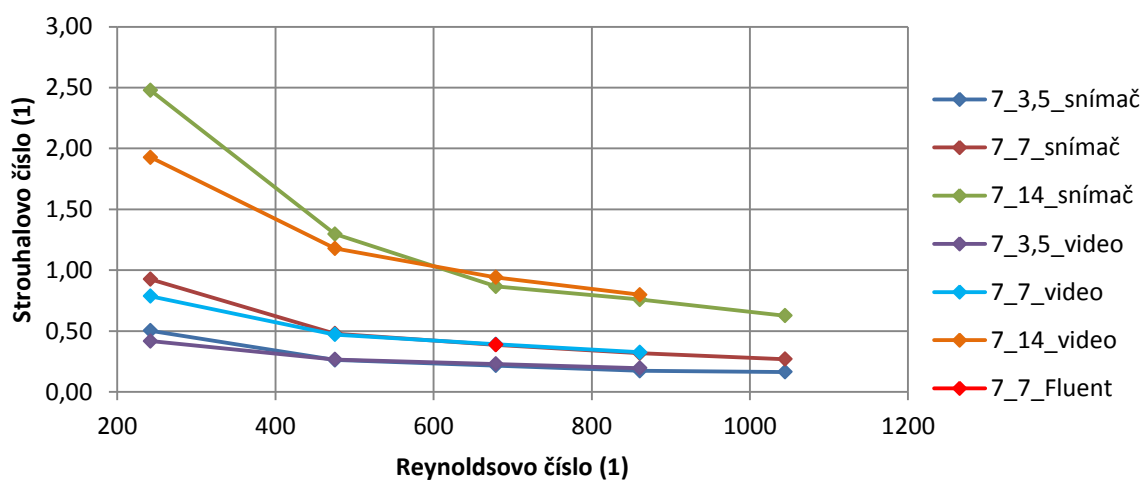


Graf 28 Frekvence pulsací vody f v závislosti na střední rychlosti proudu w_T pro mezeru 7 cm



Graf 29 Závislost Strouhalova čísla Sh na Reynoldsově čísle Re pro mezeru 14 cm

Porovnání metod určení frekvencí (snímač frekvence kmitání vodní hladiny, analýza videozáznamu vizualizace, numerická simulace, osciloskopická karta).



Graf 30 Závislost Strouhalova čísla Sh na Reynoldsově čísle Re pro mezeru 7 cm

Porovnání metod určení frekvencí (snímač frekvence kmitání vodní hladiny, analýza videozáznamu vizualizace, numerická simulace, osciloskopická karta).

7 Závěr, splnění cílů dizertační práce, přínosy pro vědní obor a praxi

Hydrodynamická analogie mezi prouděním vody a vzduchu umožňuje hledání souvislostí mezi jevy, vznikajícími při proudění obou médií. Na rozdíl od vzduchu má voda tu výhodu, že i bez vizualizačních ingrediencí je vidět to, co ve vzduchu vidět není. Při pozorování hladiny vody pod různými úhly jsou viditelné vznikající a zanikající vlny, lokální změny výšky hladiny – běžné odlesky denního světla signalizují místa, kde se něco děje. Vizualizací se uvedené jevy zvýrazní a objeví se další jevy, které předtím zůstaly skryty.

Možnost proměření lokálních výšek hladiny a frekvencí pulsací hladiny, daná konstrukcí hladinoměru a snímače frekvencí tzv. „na míru“ posunula experimentování na vyšší úroveň, měření jsou relativně jednoduchá, opakovatelná, a při dodržení metodických postupů a pečlivém provádění všech úkonů lze chybu „lidského faktoru“ prakticky zanedbat.

7.1 Kvantifikace rizik a chyb hydrodynamické analogie, vytvoření směrnice pro výběr modelové kapaliny

Nejzávažnější chybou hydrodynamické analogie je to, že byl modelován ideální plyn s adiabatickým exponentem $\kappa = 2$. Díky této idealizaci se odvození výrazně zjednoduší bez podstatné ztráty vypovídající hodnoty. Chybám je věnována celá kapitola 2.1.7.

Rizikovým faktorem při experimentování v hydrodynamické vaně je modelová kapalina. Odvozování rovnic je uvažováno s idealizovanou kapalinou, ale ve skutečné modelové kapalině jsou vizualizační ingredience. Komplikace je i v tom, že množství přidávaných ingrediencí se v průběhu experimentu mění a vizualizační částice nejsou rozptýleny rovnoměrně v celé vodní vrstvě. Sestavení adekvátních rovnic pro koloidní soustavu (za níž lze modelovou kapalinu s vizualizačními ingrediencemi považovat) by bylo velmi náročné, a přitom se neprokázal podstatný vliv na výsledný experiment.

Dalším rizikem je výběr vhodné modelové kapaliny. Jedná se o komplikovanou záležitost, konečný výběr modelové kapaliny je kompromisem. Posuzuje se, zda je kapalina vhodná svými fyzikálními vlastnostmi, je-li bezpečná pro obsluhu, roli hraje i finanční stránka věci. Vhodnost modelové kapaliny závisí na její viskozitě, hustotě, povrchovém napětí. Závisí i na „snášlivosti“ s vizualizačními ingrediencemi. Směrnice pro výběr modelové kapaliny vychází z porovnání dvou poměrů, a to poměru dynamické viskozity a hustoty a poměru povrchového napětí a hustoty. Kritérium bezpečnosti je hodnoceno zdravotním a ekologickým rizikem, stupněm třaskavosti a těkavosti. V hodnocení dokonalosti pro účely vizualizace není voda na předním místě, přesto byla vybrána pro snadnou dostupnost, bezpečnost a relativně nízkou cenu. Navíc je téměř jisté, že nereaguje s použitými vizualizačními přísadami.

7.2 Návrh a konstrukce snímače pro přesná měření výšek hladiny a frekvence kmitání hladiny, návrh traverzovacího zařízení

Při experimentování v hydrodynamické vaně je počítáno s tím, že výsledky, získané v kapalině mohou být aplikovány na plyn. Převod z kapaliny na plyn lze provést použitím závěrů hydrodynamické analogie, v nichž jednou z „důležitých“ veličin je výška hladiny vody. Tento požadavek byl podnětem pro návrh a konstrukci přesného měřicího zařízení.

Měření výšky hladiny mikrometrem, prováděné při předcházejících měřeních mělo pouze orientační význam. Výsledek ovlivňovala koncová část mikrometru, na níž se velmi výrazně projevovala vztlakovost vody. Nepřesnost odečtených hodnot byla vylepšena úpravou koncové části mikrometru, při níž bylo válcovité zakončení mikrometru nahrazeno kuželovitým čidlem. Výsledky se sice zpřesnily, ale nijak výrazně. Bylo třeba najít jiné, lepší měřidlo,

a tak byl proveden podrobný průzkum trhu. Bohužel žádné z vyhledaných měřidel nevyhovovalo požadavkům – největší slabinou prodávaných přístrojů byl rozsah měření, kdy tolerance, uváděná výrobcem, několikanásobně překračovala celkovou tloušťku vrstvy vody v modelovém stole. Druhý, neméně podstatný nedostatek, se týkal měření v konkrétním bodě – prodávané přístroje měřily tak, že se snímala větší oblast a výsledná hodnota byla průměrem hodnot, získaných proměřením této oblasti.

Při analýze kmitů je nutno kmity identifikovat a změřit jejich frekvenci. V minulosti byly kmity identifikovány přímým pozorováním a frekvence kmitání byla zjišťována z pohybu nitěných sond, umístěných v modelové sestavě. Poloha sond ve směru dno-hladina musela být kontrolována, sondy nesměly plavat na hladině ani se dotýkat dna. Tento časově náročný způsob určování frekvencí je časově náročný a výsledky ovlivňuje „lidským faktorem“. Z toho důvodu bylo třeba měření inovovat, resp. najít nebo zkonstruovat vhodný přístroj.

Vlastnímu návrhu a konstrukci přístroje, jímž by se dala v konkrétním bodě měřit výška hladiny s přesností desetiny milimetru a přístroje, schopného naměřit frekvence chvění hladiny, předcházel průzkum rozsáhlé databáze Úřadu průmyslového vlastnictví v Praze. Domněnka, že bude nalezen přístroj, který sice není vyráběn, ale existuje jako prototyp, se nepotvrdila. Bylo zjištěno, že neexistují žádné přístroje, jimiž by bylo možné provést požadovaná měření. Úspěšný vývoj a konstrukce „Snímače hladiny elektricky vodivé kapaliny, zejména výšky hladiny a frekvence jejího kmitání“ byl potvrzen zápisem užitého vzoru na Úřadě průmyslového vlastnictví.

Návrh, konstrukce a montáž speciálního traverzovacího zařízení znamenaly velký zásah do celé konstrukce, ale pro přesná měření a opakovatelnost experimentů byl tento proces nevyhnutelný. Masívní kolejnice z jechlů a pojezd pro záznamovou techniku byly nahrazeny speciálním traverzérem pro 2D pohyb záznamového zařízení, nově také pro pohyb měřících zařízení. Traverzovací zařízení je konstruováno jako soustava vodorovných hliníkových profilů – jednoduchých a dvojítych kladkových vedení a nerezových vozíků vedení. Podélná vedení jsou ukotvena na rám hydrodynamické vany, pohyblivé části jsou k nim připojeny pomocí vozíků. Na příčných vedeních jsou prostřednictvím dalších vozíků připojeny plošiny měřícího zařízení a držáky kamery a fotoaparátu. Celý systém je opatřen unikátními doražy a aretacemi vlastní výroby a je konstruován tak, aby bylo možné pohybovat měřícími zařízeními nezávisle na pohybu záznamové techniky. Traverzovací zařízení je opatřeno měřítky – lze nastavit polohu měřící sondy i záznamu s přesností 1 mm. Na plošinu pro měření lze upevnit fixu, nakreslit pravoúhlou síť a podle návrhu umístit modely.

7.3 Vývoj metodiky provádění experimentů v hydrodynamické vaně

Hydrodynamická vana není nové zařízení, ale vyvinutá metodika experimentování byla vyvinuta až v rámci této práce. Rekonstrukce hydrodynamické vany, modernizace příslušenství, vývoj nového měřícího zařízení, provedení řady testování a stanovení funkčních vlastností hydrodynamické vany byla možná jen díky dlouhodobé systematické činnosti.

Problematiku provádění experimentu lze z metodického hlediska rozčlenit na dvě oblasti: chod experimentálního zařízení a realizaci daného experimentu.

V souvislosti s provozem hydrodynamické vany byly podrobně popsány veškeré její části, byla definována jejich „dílčí“ funkce v celém systému. V případě „pohyblivých“ částí je určen způsob manipulace s nimi, případně jsou zmíněna rizika ovládnutí, která by mohla vést k likvidaci výsledků nebo k poškození experimentu. Některé součásti hydrodynamické vany prošly během doby používání několika vývojovými fázemi. Dokončeno bylo traverzovací zařízení a snímač výšky hladiny a frekvence pulsací vodní hladiny. Ve fázi přípravy je návrh regulace přítoku do hydrodynamické vany. V rámci vývoje vznikl manuál k obsluze – samo-

statná publikace „Hydrodynamická vana“, v níž je detailní popis celého zařízení včetně příslušenství, návod k ovládání a limity pro použití.

Druhá část metodiky zahrnuje činnosti, spojené s realizací konkrétních experimentů. Zde je důležité určit parametry experimentu, zejména rozměry modelové sestavy (pozorovatelný obraz proudění), délku vstupního kanálu (eliminace nežádoucích vírových struktur), typ úlohy (co je pevné a co je pohyblivé a jak se pohyblivé ovládá) a vizualizační metodu. V rámci vývoje metodiky vznikla samostatná publikace „Testovací experimenty“, v níž je soubor experimentů s obtékáním i průtokem modelovými sestavami, pohyblivými i pevnými modely, různými vizualizačními metodami.

U každého experimentu je schéma experimentu, důvod pro realizaci daného konkrétního experimentu. Dále je uvedeno, které parametry budou konstantní, měřené a dopočítávané. Je definováno, co se bude měřit, v kterém místě a jaké zařízení se k tomu použije. Experiment je dokumentován fotografiemi, naměřenými hodnotami (grafy), případně numerickou simulací. Z experimentů jsou vyvozeny závěry, z nichž vyplývá, co si lze v rámci experimentu „dovolit“ a zároveň si ušetřit nebo alespoň minimalizovat komplikace.

Vyvinutá metodika provádění experimentů je v kapitole Experimenty. Popis metodiky je vysvětlen na úloze o obtékání válce. Aplikace metody je ukázána na úlohách s plněním dutin.

7.4 Přínos pro obor

Hlavním přínosem této práce je vznik je uceleného souboru, zahrnujícího nejen pracovní postupy, návody a dimenze pro experimentování na unikátním zařízení hydrodynamická vana, ale také konstrukční řešení snímačů a traverséru pro měření. Vytvořený metodicko-didaktický celek nebyl do této doby publikován. V rámci oboru lze přínosy shrnout v následujících bodech:

- *byla vytvořena a ověřena originální metodika identifikace samobuzených oscilací – periodických i neperiodických nestacionarit v úplavech a dutinách,*
- *bylo navrženo unikátní zařízení pro přesnou identifikaci samobuzených kmitů, bodové měření výšky hladiny a měření frekvence pulzace hladiny při obtékání těles a plnění dutin,*
- *výrazným způsobem byla inovována unikátní měřicí trať a formulovány funkční limity jejího využití.*

7.5 Návaznost na disertační práci

Na tuto disertační práci bude navázáno výzkumem dalších geometrií dutin (měření, vizualizací a numerickou simulací) a úpravami hydrodynamické vany (příslušenství). Bude postupováno v jednotlivých krocích:

- *identifikace a analýza skokových změn pro nové geometrie dutin v návaznosti na výsledky, znázorněné v grafu č. 18*
- *numerická simulace problému ve 3D,*
- *další úpravy příslušenství hydrodynamické vany, týkající se stability přítoku a možnosti použití jiných metod vizualizace.*

Použitá literatura

Vlastní publikace

- [A1] PETŘÍKOVÁ, M. Experimental study of the flow properties if the water stream run up against to the sharp edge of cavity. In. *Machine design vol.8 (2016) no.1*, Novi Sad, Faculty of technical sciences, ADEKO – Association for design, elements and constructions, pp. 19-22, ISSN 1821-1259.
- [A2] PETŘÍKOVÁ, M. *Hydrodynamická vana – návod k používání*, Technická univerzita v Liberci, 2013.
- [A3] PETŘÍKOVÁ, M. *Testovací experimenty v hydrodynamické vaně*, Technická univerzita v Liberci, 2013
- [A4] PETŘÍKOVÁ, M., KRYŠTŮFEK, P. Measurement of local fluid levels and oscillation frequency on the reconstructed hydrodynamic table. In *Experimental Fluid Mechanics 2013*, Kutná Hora: Technická univerzita v Liberci, 19.-22.11.2013, pp. 550-555, ISBN 978-80-260-5375-0.
- [A5] PETŘÍKOVÁ, M.: Speciální traverzer pro realizaci přesných měření a záznamu experimentů na hydrodynamickém stole, funkční vzorek. Technická univerzita v Liberci, 2013.
- [A6] PETŘÍKOVÁ, M., PEUKERT, P., KRYŠTŮFEK, P. Self-excited flow oscillations inside cavity. In. *Machine design vol.4 (2012) no.4*, Novi Sad, Faculty of technical sciences, ADEKO – Association for design, elements and constructions, pp. 213-218, ISSN 1821-1259.
- [A7] KRYŠTŮFEK, P., PETŘÍKOVÁ, M. Check accuracy of oscillation frequency of flow inside a cavity. In *Experimental Fluid Mechanics 2012*, Hradec Králové: Technická univerzita v Liberci, 20.-23.11.2012, pp. 367-370, ISBN 978-80-7372-912-7.
- [A8] PETŘÍKOVÁ, M., PEUKERT, P., KRYŠTŮFEK, P. Investigation of self-excited oscillation incide cavity. In. *The 7th International Symposium KOD 2012 Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering*, Balatonfüred, Hungary: Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Faculty of Mechanical Engineering, Bratislava, 24.-26.5.2012, pp. 439-444, ISBN 978-86-7892-399-9.
- [A9] PETŘÍKOVÁ, M., PEUKERT, P., UNGER, J. Investigation of fluid stream oscillation inside resonator of a wind instrument with the use of hydrodynamic table. In *Experimental Fluid Mechanics 2011*, Jičín: Technická univerzita v Liberci, 22.-25.11.2011, pp. 390-393, ISBN 978-80-7372-784-0.
- [A10] PETŘÍKOVÁ, M., KRYŠTŮFEK, P. Porovnání experimentů v hydrodynamické vaně s numerickou simulací turbulentního modelu k- ω . In *30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Špindlerův Mlýn: Technická univerzita v Liberci, 22.-24.6.2011, pp.187-190, ISBN 978-80-7372-747-5.
- [A11] PETŘÍKOVÁ, M., VEREŠ, M. Virtual and real hydrodynamic models quality evaluation by flow visualization method in low level bath. In *Machine design 2010*, Novi Sad, Srbsko: University of Novi Sad, 2010, pp.103-106, ISSN 1821-1259.
- [A12] PETŘÍKOVÁ, M., DVOŘÁK, V., VEREŠ, M. Verifying og virtual and real hydrodynamic models by flow visualization in Bratislava, 2009, pp.153-160, ISBN 978-80-227-3326-7.
- [A13] PETŘÍKOVÁ, M., UNGER, J. Shape optimizing of the level measuring probe gauge. In *Experimental Fluid Mechanics 2009*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 25.-27.11.2009, pp.273-278, ISBN 978-80-7372-538-9.
- [A14] PETŘÍKOVÁ, M., KRYŠTŮFEK, P., UNGER, J. Check accuracy of surface height measuring and oscillation frequency of flow. In *Experimental Fluid Mechanics 2009*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 25.-27.11.2009, pp.279-286, ISBN 978-80-7372-538-9.
- [A15] PETŘÍKOVÁ, M. *Experimentální metodika a zařízení pro identifikaci a optimalizaci disipativních procesů vizualizačními metodami*. Nepublikovaná přednáška a teze ke státní doktorské zkoušce, Technická univerzita v Liberci, 2008, p.51.
- [A16] KRYŠTŮFEK, P., PETŘÍKOVÁ, M. Identification of quality vessel emptying in dependence on its depth. In *Experimental fluid mechanics 2008*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 26.-28.11.2008, pp. 98-108, ISBN 978-80-7372-417-7.
- [A17] PETŘÍKOVÁ, M., KRYŠTŮFEK, P. Identifikation of self-excited nonstationarities using visualization and numeric simulation. In *International Conference Mechanical engineering 2008*, Bratislava: Slovak university of technology in Bratislava, 13.-14. 11.2008, abstrakt pp. III-22 – příspěvek CD-ROM, ISBN 978-80-227-2987-1.
- [A18] PETŘÍKOVÁ, M. Flow visualization in hydrodynamics bath. In *Experimental fluid mechanics 2007*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 28.-30.11.2007, pp. 111-119, ISBN 978-80-7372-273-9.

- [A19] PETŘÍKOVÁ, M., KRYŠTŮFEK, P., KNEŘ, J. Hydrodynamická vana s nízkou hladinou, In *International Conference Mechanical engineering 2007*, Bratislava: Slovak university of technology in Bratislava, 29. – 30. 11. 2007, abstrakt pp. 60 – příspěvek CD-ROM, ISBN 978–80–227–2768–6.
- [A20] PETŘÍKOVÁ, M. *Databáze fotografií experimentů 2007-2013*. Liberec: Technická univerzita v Liberci.

Vlastní osvědčení

- [A21] PETŘÍKOVÁ, M., KNEŘ, J., JERJE, P. *Snímač hladiny elektricky vodivé kapaliny, zejména výšky hladiny a frekvence jejího kmitání*. Osvědčení o zápisu užitého vzoru. Česká Republika – Úřad průmyslového vlastnictví, zapsáno 25.10.2010, číslo zápisu 21409, druh dokumentu U1, číslo přihlášky 2010-23027.

Literatura a odkazy k teoretické části disertační práce

Knihy, skripta, učební texty

- [1] AGROSKIN, I.I., DMITRIJEV, G.T., PIKALOV, F.I. *Hydraulika 1*. (M. Hibš, K.Z. Kebort, Trans.). Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955 (Original work published 1950). p.412.
- [2] ČARNÝJ, i.a. *Osnovy gazovoj dynamiky*. Moskva: Gosudarstvennoje naučno-techničeskoe izdatelstvo nef-tjanoj i gorno-toplivoj literatury, 1961. p.199
- [3] NOŽIČKA, J. *Analogové metody v proudění*. Praha: Academia Praha, 1967. p.202.
- [4] ŠIDLOF, P.(1972) *Použití hydrodynamické analogie pro výzkum výměny obsahu válců spalovacích motorů*. Kandidátská disertační práce, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, Fakulta strojní, Liberec.
- [5] LADENGURG, R.W., LEWIS, B., PEASE, R.N., TAYLOR, N.S. *Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion*. Oxford: Oxford University Press, 1955. p.484.
- [6] BAHR, A. Über die Genauigkeit der Untersuchung von Profiltgittern in der Wasserströmung mit freier Oberfläche. *Maschinenbautechnik*, 1961(9). Berlín: VEB Verlag technik, 1956-1989. ISSN 0025-4495
- [7] UNGER, J., URBÁŠEK, J. *Visualisace průtoku mezikruhovými přechody*, [dílčí výzkumná zpráva, č.úkol RS-03-124-004]. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, Fakulta strojní, 1976, p.136
- [8] ŠUTA, M. *Chemické látky v životním prostředí a zdraví*. Brno: Ekologický institut Veronica, 2008. ISBN 978-80-87308-00-4
- [9] JIRKŮ, S., KLEPŠ, Z., NOŽIČKA, J. *Tabulky pro mechaniku a strojnictví*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 1993. ISBN80-01-00914-9. 297s.
- [10] ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L. *Tabulky pro fyziku*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta pedagogická, 2001. ISBN 80-7083-553-2. p.37
- [11] KORBAŘ, T., Stránský, A. a kolektiv *Technický naučný slovník*. Praha: Státní technické nakladatelství technické literatury, 1962, p.651
- [12] VOJUCKIJ, S. S. *Kurs koloidní chemie* (V. Karpenko, J Šobr, Trans.). Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. (Original work published 1975). p.397.
- [13] KOPECKÝ, V. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Liberec: TRIBUN EU Brno, 2008. ISBN 978-80-7399-357-3. p.204.
- [14] MERZKIRCH, W. *Flow visualization*, New York and London: Academic press, 1974. p.250. ISBN-0-12-491350-4
- [15] ŘEZNIČEK, R. Visualisace proudění (Optické metody vyšetřování proudění tekutin), Praha: Academia, 1972. p.165
- [16] BREUER, M. Numerical and modeling influences on large eddy simulations for the flow past a circular cylinder. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 19 (1998), p. 512-521.
- [17] FRANKE, J., FRANK, W. Large eddy simulation of flow past a circular cylinder at $Re_D=3900$. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002.
- [18] LIAW, K. F. Simulation of flow around Bluff Bodies and Bridge Deck section using CFD. *Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of doctor Philosophy*, 2005.
- [19] ROSHKO, A. *On the Development of turbulent Wakes from Vortex Streets*. NACA Report 1191, 1954.
- [20] VEREŠ, M., BOŠANSKÝ, M., GADUŠ, J. *Theory of convex-concave and plane cylindrical gearing*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, 2006. p.180. ISBN 80-227-2451-3.
- [21] DANEŠ, V. *Fyzikální chemie II.-1. část*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Vysoká škola chemická v Praze, 1952. p.290.

- [22] DANEŠ, V. *Fyzikální chemie II.-2. část*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Vysoká škola chemicko-technologického inženýrství, 1952. p.290.
- [23] DANEŠ, V. *Fyzikální chemie I.-1. část* (2nd ed.). Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta chemická, 1952. p.116.
- [24] JIRSÁK, M. *Experimentální zařízení a metody v mechanice tekutin*, Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 1977. p.117.
- [25] KOLÁŘ, V., PATOČKA, C. BÉM, J. *Hydraulika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983. p.480
- [26] MAŠTOVSKÝ, O. *Hydromechanika pro strojní inženýry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. p.272.
- [27] RAŽNJEVIČ, K. *Tepelné tabulky a diagramy*. (M.Mičátek, V. Mičátková, Trans.). Bratislava: ALFA Bratislava, 1969 (Original work published 1958). p.340.
- [28] STAREK, L., CHMELKO, V. *Experimentálne metódy v mechanike*, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, 2007.
- [29] ŠOCH, P., VRÁTNÝ, J. *Experimentální metody v mechanice tekutin I.*, Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 1987
- [30] TESAŘ, V. *Mezní vrstvy a turbulence*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Praha, 1991. p.196.
- [31] URGOŠÍK, B. *Fyzika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. p.296.

Internetové knihy

- [32] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin*, Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1508-4. 1.7.2010, <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [33] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin – FLUENT, CFX*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita v Ostravě, 2008, p.153. 7.3.2011, <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [34] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. *Vizualizační a optické měřicí metody*. VUT Brno 2007, 2. vydání. 3.3.2008, <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika>
- [35] HASAL, P., SCHREIBER, I., ŠNITA, D. et al. *Chemické inženýrství I.* (2nd ed.). Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007, ISBN 978-80-7080-002-7. p.351. 8.8.2011, http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-002-7/pages-img/001.html
- [36] JANALÍK, J. *Obtékání a odpor těles*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1911-2. 30.3.2009, <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [37] KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Mechanika tekutin – návody na laboratorní měření*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN není. 1.7.2010, <http://www.338.vsb.cz/PDF/navod.pdf>
- [38] MALIJEVSKÝ, A., NOVÁK, J. P., LABÍK, S., MALIJEVSKÁ, I. *Breviář z fyzikální chemie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2001, ISBN 80-7080-403-3. p.280. 1.7.2010, <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/BREVAL.pdf>

Internetové odkazy

- [39] 16.8.2010, http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/povrchove_napeti_kapalin.html
- [40] 16.8.2010, <http://scienceworld.wolfram.com/physics/SurfaceTension.html>
- [41] 17.9.2015, http://14.139.172.204/nptel/CSE/Web/105104098/fluid_final/lecture-31/31-3_mechanics.htm, Photograph courtesy Werle and Gallon (Onera)

Literatura k experimentální části disertační práce

Experimentální zařízení

- [42] Armfield – katalog 2008. 10.3.2008, www.armfield.co.uk
- [43] GUNT – katalog 2008. 2.4.2008, 29.2.2009, http://www.gunt.de/static/s10_1.php?p1=&p2=&pN

Modely

- [44] AZ Plastik, s.r.o. – katalog 2008. 2.12.2008, <http://www.az-plastik.cz/main.php?pageid=700&lang=3>

- [45] ŘEMPO HOLOUBEK, a.s. – katalog 2008. 26.11.2008, <http://www.rempoholoubek.cz/eshop/plasty/desky.htm>
- [46] ZENIT, s.r.o. – katalog 2008. 26.11.2008, <http://www.zenit.cz/o-spolecnosti>

Vizualizační ingredience

- [47] Agfa-Gevaert Group – katalog 2007. 3.5.2007, <http://www.agfa.com/en/sp/index.jsp>
- [48] ALBO SCHLENK, s.r.o. – katalog 2007. 19.4.2007, <http://www.alboschlenk.cz/produkty/alprachy.html>
- [49] Merck, s.r.o. – katalog 2005-7. 4.5.2007, <http://www.merck.cz/cs/chemicals/chemicals.html>
- [50] Práškové kovy, speciální chemie – katalog 2008. 29.2.2008, <http://www.praskovekovy.cz/>
- [51] Severochema Liberec – katalog 2007. 4.5.2007, <http://www.severochema.cz/>
- [52] Synthesia, a.s. – katalog 2007. 19.4.2007, <http://www.synthesia.cz/static/contact-us.do>
- [53] Synthesia, a.s. – katalog 2009. 29.2.2008, <http://www.synthesia.cz/static/contact-us.do>
- [54] Unger fabrikker, a.s. katalog 2007. 4.5.2007, <http://www.ungersurfactants.com/?CatID=1231>

Měřicí přístroje

- [55] BADGER METER, s.r.o. 5.3.2008, <http://www.badgermeter.cz/>
- [56] eFunda – katalog 2008. 29.2.2008, http://www.efunda.com/designstandards/sensors/flowmeters/flowmeter_vtx.cfm
- [57] KADLEC, K. *Měřicí technika*, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2005-2007. 5.3.2009, <http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mt.html>
- [58] KADLEC, K. *Měřicí technika*, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2005-2007. 29.2.2008, <http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mt.html>
- [59] KOBOLD Messring BmbH – katalog 2009. 23.7.2009, <http://www.kobold.com/>

Software

- [60] *Adobe Photoshop CS5* (2010), San Jose, California, ADOBE SYSTEMS INCORPORATED
- [61] *Fluent 6.3.23* (2006), 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766 United States, Fluent Inc.
- [62] *ANSYS Fluent 12* (2010), Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, ANSYS, Inc.
- [63] *ANSYS Fluent 13* (2011), Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, ANSYS, Inc.
- [64] *ANSYS Fluent 14* (2012), Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, ANSYS, Inc.
- [65] *Pinnacle Studio 12* (2008), 280 North Bernardo Avenue, Mountain View, California 94043, Pinnacle Systems (A division of Avid)
- [66] *Zoner Photo Studio 12* (2010), Nové sady 18, 602 00 Brno, ZONER software, a.s.

Literatura k užitému vzoru

Internetové knihy

- [67] KADLEC, K. *Měřicí technika*, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2005-2007. 5.3.2009, <http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mt.html>
- [68] MENSCHEL, S. (2007). Rozmanitost při měření hladiny. *Automatizace – Odborný časopis pro automatizaci, měření a inženýrskou informatiku*, 50 (6). 6.3.2009, <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1792>
- [69] ŠTĚTINA, J., JAROŠ, M., RAMÍK, P. *Virtuální laboratoř – Měření snímače, metody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 29.9.2008, <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/index.htm>

Katalogy

- [70] BADGER METER, s.r.o. 5.3.2008, <http://www.badgermeter.cz/>
- [71] BCM Control, s.r.o. – katalog 2008. 4.4.2008, <http://www.bcmcontrol.cz/>
- [72] ENERGO NOVA – katalog 2008. 29.2.2008, <http://www.energonova.cz/>

- [73] ENERGO NOVA – katalog 2009, 6.2.2009, <http://www.energonova.cz/>
- [74] KOBOLD Messring BmbH – katalog 2009, 23.7.2009, <http://www.kobold.com/>
- [75] Omega Engineering – katalog 2008, 6.3.2008, <http://www.omegaeng.cz/shop/flow-level.html>

Úřad průmyslového vlastnictví



- [76] Analogový snímač výšky hladiny, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/194/194379.pdf>
- [77] Automatický hlásič stavu hladiny, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/114/114993.pdf>
- [78] Čidlo pro dálkové měření malých změn výšky hladiny, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/264/264446.pdf>
- [79] Čidlo pro přesné měření výšky hladiny kapalin, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/123/123305.pdf>
- [80] Čidlo s kmitajícími kontakty pro měření výšky hladiny elektricky vodivých kapalin, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/124/124116.pdf>
- [81] Elektrické čidlo proměření proudu v plynu, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/139/139366.pdf>
- [82] Elektrický třípolohový snímač hladiny, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/144/144576.pdf>
- [83] Elektroodový snímač výšky hladiny kapalin, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/188/188075.pdf>
- [84] Fotoelektrický snímač výšky archů, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/207/207424.pdf>
- [85] Hladinoměr k přesné nivelaci hladin, 3.2.2009, http://spisy.upv.cz/Applications/1995/PPVCZ1995_1493A3.pdf
- [86] Hladinový snímač 2, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0019/uv019268.pdf>
- [87] Hladinový snímač, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/246/246231.pdf>
- [88] Hlasič mezních stavů, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/150/150878.pdf>
- [89] Kapacitní snímač hladiny kapaliny – neúspěšný pokus, 5.2.2009, http://spisy.upv.cz/Applications/1987/PPVCZ1987_9456A3.pdf
- [90] Kapacitní snímač pro signalizace úrovně hladiny tekutin a sytkých hmot, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/205/205940.pdf>
- [91] Kapacitní snímač výšky hladiny kapaliny, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0019/uv019016.pdf>
- [92] Kapacitní snímač výšky hladiny vody, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/201/201334.pdf>
- [93] Magnetický snímač hladiny, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/126/126856.pdf>
- [94] Odporový dotykový snímač hladiny kapalného plynu, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/157/157842.pdf>
- [95] Piezoelektrický snímač hladiny kvapalín, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/156/156786.pdf>
- [96] Piezometrický snímač tečného napětí na obtékané stěně, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/234/234236.pdf>
- [97] Plovákový snímač hladiny 1, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/243/243545.pdf>
- [98] Plovákový snímač hladiny 2, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/244/244798.pdf>
- [99] Plovákový snímač hladiny kapaliny s optoelektrickým převodníkem, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/254/254866.pdf>
- [100] Plovákový snímač hladiny, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/152/152060.pdf>
- [101] Pneumatický hlásič přítomnosti vody, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/157/157891.pdf>
- [102] Průtokový polovodičový snímač, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/100/100506.pdf>
- [103] Snímač hladiny 1, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/148/148670.pdf>
- [104] Snímač hladiny 2, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/199/199790.pdf>
- [105] Snímač hladiny 3, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/214/214647.pdf>

- [106] Snímač hladiny, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/266/266709.pdf>
- [107] Snímač obtékání stěny tekutinou, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/233/233290.pdf>
- [108] Snímač obtékání stěny s elektrickým výstupem, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/247/247752.pdf>
- [109] Snímač průtoku, 5.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/169/169682.pdf>
- [110] Snímač rychlosti proudu plynů a kvapalín, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/141/141284.pdf>
- [111] Snímač stavu hladin sypkých materiálů, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/139/139980.pdf>
- [112] Snímač výšky hladiny elektricky vodivých kapalin, 6.2.2009, <http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pta.detail>
- [113] Snímač výšky hladiny kapalin A, 6.2.2009, http://spisy.upv.cz/Applications/2006/PPVCZ2006_0629A3.pdf
- [114] Snímač výšky hladiny kapalin B, 6.2.2009, <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0017/uv017070.pdf>
- [115] Tenzometrický snímač tlaku, 3.2.2009, <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/104/104309.pdf>

Osvědčení o zápisu užitého vzoru

Číslo zápisu:	21409	Datum zápisu:	25.10.2010
Číslo přihlášky:	2010-23037	Datum přihlášení:	30.07.2010
Právo přednosti podle mezinárodní smlouvy (bylo-li uplatněno a uznáno) od:			
MPT:	G 01 F 23/22	(2006.01)	
	G 01 F 23/00	(2006.01)	
	G 01 H 3/00	(2006.01)	
Název:	Snímač hladiny elektricky vodivé kapaliny, zejména výšky hladiny a frekvence jejího kmitání		
Majitel:	Technická univerzita v Liberci, Liberec, CZ		
Původce:	Petříková Markéta Ing., Liberec, CZ Kneř Jaroslav, Jablonec nad Nisou, CZ Jerje Petr, Liberec, CZ		

V Praze dne 25.10.2010

Úřad průmyslového vlastnictví v zápisném řízení nezjišťuje, zda předmět užitého vzoru splňuje podmínky způsobilosti k ochraně podle § 1 zák. č. 478/1992 Sb.